

**Roadmap voor de modellering
van verspreiding
microplastics in Rijkswateren**



Roadmap voor de modellering van verspreiding microplastics in Rijkswateren

Frans Buschman
Myra van der Meulen
Arjen Markus
Marc Weeber
Frank Kleissen

Titel

Roadmap voor de modellering van verspreiding microplastics in Rijkswateren

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, LELYSTAD Yann Friocourt Bert Bellert	11202218-003	11202218-003-ZKS-0002	38

Trefwoorden

Microplastics, transport, concentratie, waterkolom, bodem, effectketen, relevante processen.

Samenvatting

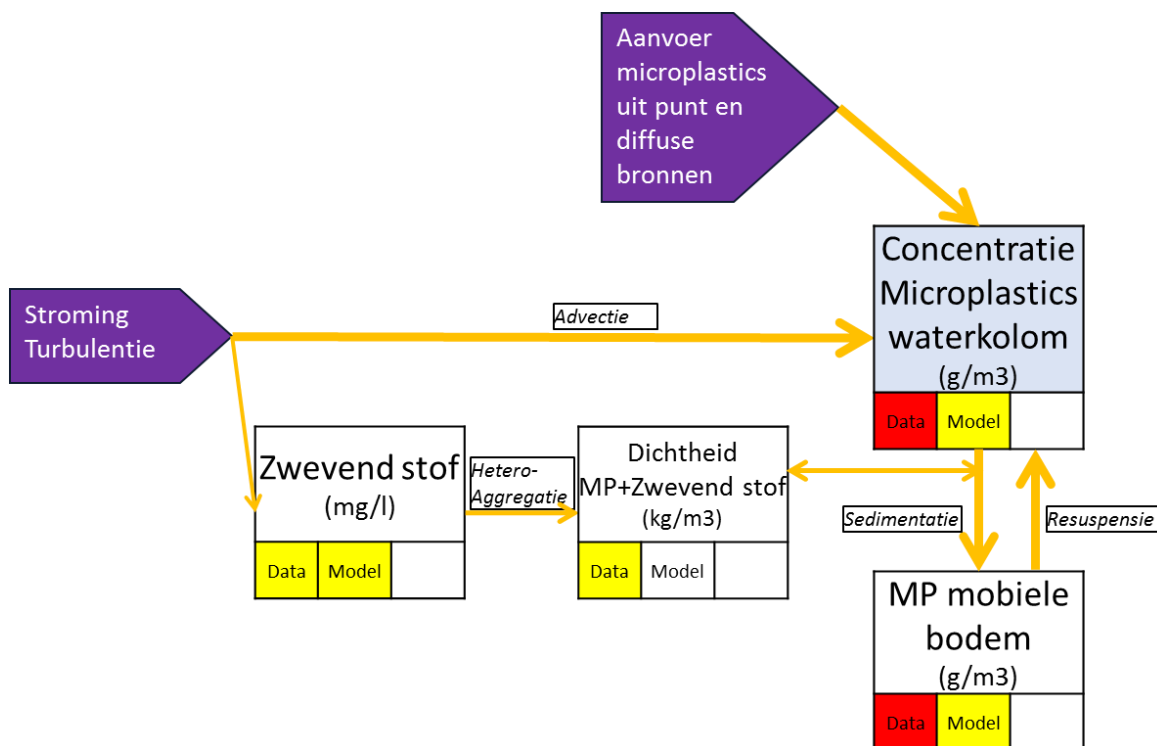
Het voorkomen van microplastics in de Rijkswateren is een punt van zorg, omdat grotendeels onbekend is wat de gevolgen zijn voor het milieu. Het ministerie Infrastructuur en Waterstaat wenst het transport van microplastics in de Rijn, Maas en andere Rijkswateren naar de Noordzee te kennen. Rijkswaterstaat werkt toe naar een toepasbare en gestandaardiseerde monitoringstrategie in zoete delen van stroomgebieden. Deze studie geeft aan welke stappen nodig zijn voor het opzetten van een modelinstrumentarium, waarmee het transport van microplastics in de Rijkswateren gemodelleerd kan worden. De belangrijkste toepassingen van dit instrumentarium zijn (1) het beschrijven van het grootschalige transport van microplastics in Rijkswateren en (2) het ontwerpen van een monitoringsstrategie, door aan te geven waar Rijkswaterstaat het best nieuwe vaste monitoringlocaties voor de concentratie van microplastics kan inrichten en door aan te geven op welk tijdstip tijdelijke metingen het best uitgevoerd kunnen worden.

Deze roadmap beschrijft niet alleen de benodigde stappen om te komen tot een modelinstrumentarium dat in 2023 effectief kan worden ingezet voor de bovenstaande toepassingen, maar ook wordt aangegeven welke kennisleemten nog aangepakt dienen te worden en welke meetgegevens nodig zijn. Om aan te geven welke fysische, chemische en ecologische processen en variabelen het belangrijkste zijn is gebruik gemaakt van een zogenoemde verrijkte effectketen. De doelvariabele voor beide toepassingen is bepaald als de concentratie van microplastics in de waterkolom. De effectketen is voor de verschillende watersystemen (rivier, kanaal, estuarium, meer en zee) op basis van *expert judgement* ingevuld. De kern van de effectketen voor al deze watersystemen wordt hieronder getoond.

Titel

Roadmap voor de modellering van verspreiding microplastics in Rijkswateren

Opdrachtgever Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, LELYSTAD Yann Friocourt Bert Bellert	Project 11202218-003	Kenmerk 11202218-003-ZKS-0002	Pagina's 38
--	--------------------------------	---	-----------------------



Microplastics worden aangevoerd uit puntbronnen zoals rioolwaterzuiveringsinstallaties en via diffuse bronnen, zoals afstroming van regenwater. Vervolgens worden de microplastics in met name de rivieren met de stroming mee gevoerd. Op deze manier komen microplastics uit Duitsland (Rijn) en België (Maas) Nederland binnen. Door sedimentatie op plaatsen met lage stroomsnelheden (bijvoorbeeld een uiterwaard) kunnen microplastics op de waterbodem terecht komen. Bij voldoende grote stroomsnelheid zullen de microplastics weer in resuspensie gaan in de waterkolom. Sedimentatie en resuspensie en de balans hiertussen is afhankelijk van het deel van de microplastics dat is verbonden met zwevende stof tot aggregaten. Een aggregaat heeft een hogere dichtheid en zal daarmee sneller sedimenteren. De dikte van de pijlen geeft het belang aan van een proces. Advectie (transport door stroming), sedimentatie en resuspensie zullen vaak in veel Rijkswateren dominant zijn.

De kleuren bij de variabelen in de effectketen geven aan of voldoende meetgegevens (data) beschikbaar zijn voor het valideren van de modellen. Voor de concentratie microplastics is de kleur rood: momenteel is onvoldoende data beschikbaar zijn om modellen te kalibreren of te valideren. Zonder meer meetgegevens in vooral rivieren, kanalen, meren en estuaria heeft het weinig nut om modellen op te zetten, omdat de waarde van de modeluitkomsten dan niet ingeschat kan worden.

Titel

Roadmap voor de modellering van verspreiding microplastics in Rijkswateren

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, LELYSTAD Yann Friocourt Bert Bellert	11202218-003	11202218-003-ZKS-0002	38

Op basis van deze effectketens is bepaald dat het verzamelen van meetgegevens op vaste locaties met een vast interval (maximaal 2 weken) minimal noodzakelijk is. Naast het verzamelen van metingen met een vast tijdsinterval op vaste plaatsen, is het belangrijk om incidentele hoogfrequente metingen te doen, zodat goede validatiedatasets beschikbaar komen voor de modellering. Op basis van de vaste en incidentele metingen kan bepaald worden (1) wat de aanvoer van microplastics vanuit rivieren en het mariene milieu is, (2) hoeveel microplastic deeltjes er in de waterkolom zitten en (3) hoeveel microplastic deeltjes in de mobiele bodem zitten.

Naast de dringende behoefte aan meetgegevens zijn kennisleemtes aangegeven. De belangrijkste vragen zijn:

1. Bij welke stroomsnelheid wordt resuspensie van microplastics tot stand gebracht?
2. Wat is de uitwisseling tussen waterkolom en oever voor verschillende condities?
3. Hoe beïnvloedt vegetatie sedimentatie en resuspensie?

Specifiek voor ieder watersysteem zijn de belangrijkste kennisleemten aangegeven. In meren en de zee kan de rol van organismen mogelijk aanzienlijk zijn door filtering van microplastics uit de waterkolom. Hoe groot is op dit moment niet duidelijk.

Wat betreft software kan grootschalig het beste gebruik worden gemaakt van WAQ en op kleinere schaal van PART. Over enkele jaren kan geen gebruik meer worden gemaakt van de deeltjesmodule PART, wanneer de 6^e generatie software D-hydro hiervoor niet geschikt wordt gemaakt. Advies is om in 2019 deeltjesmodellering met 3D D-hydro modellen mogelijk te maken. Hiervoor staan stappen beschreven. Ook wordt geadviseerd WAQ en PART te combineren, zodat de functionaliteit van PART gebruikt kan worden als onderdeel van WAQ. Ook hiervoor staan stappen beschreven. Deze combinatie van de twee pakketten kan het best gelijktijdig met de aanpassing aan D-Hydro worden uitgevoerd in 2019.

Het modelinstrumentarium voor 2023 is grof uitgewerkt voor een laag, een gemiddeld en een hoog ambitieniveau. Voor toepassing 1 is een opbouw mogelijk, waarbij richting 2023 steeds meer processen worden meegenomen in de WAQ modellering met als voorwaarde dat een procesformulering beschikbaar is of komt. Voor toepassing 2 is de visie van Deltares om toe te werken naar de variant met gemiddeld ambitieniveau die gebruik maakt van het deeltjesmodel PART, waarvoor alle processen beschreven in de effectketens zijn opgenomen. De stappen zijn voor drie perioden (2019, 2020-2021 en 2022-2023) aangegeven. Het belang van het continueren van goede vaste en incidentele monitoring blijft groot.




Titel

Roadmap voor de modellering van verspreiding
microplastics in Rijkswateren

Opdrachtgever Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, LELYSTAD Yann Friocourt Bert Bellert	Project 11202218-003	Kenmerk 11202218-003-ZKS-0002	Pagina's 38
--	--------------------------------	---	-----------------------

Referenties

EMFZV project: KPP BOO waterkwaliteitsmodelschematisaties 2018.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	nov. 2018	Frans Buschman Myra van der Meulen Arjen Markus Marc Weeber Frank Kleissen		Arno Nolte Dick Vethaak		Frank Hoozemans	

Status

definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Probleemstelling	1
1.3	Doelstelling	2
1.3.1	Verspreiding in Rijkswateren	2
1.3.2	Monitoring van microplastics concentratie	3
1.4	Aanpak en uitgangspunten	3
2	Bestaande kennis, software en modelschematisaties	5
2.1	Kennisbasis	5
2.1.1	Korte samenvatting relevante projecten	5
2.1.2	Korte duiding relevante artikelen	6
2.1.3	Definitie relevante processen	6
2.1.4	Aandachtspunten modellering	7
2.2	Procesbeschrijving software	8
2.2.1	Inleiding	8
2.2.2	WAQ en PART	8
2.2.3	Keuze tussen WAQ en PART per toepassing	9
2.3	Modelschematisaties	10
3	Van conceptueel model naar benadering volgens een effectketen	11
3.1	Inleiding: doelvariabele	11
3.2	Conceptueel model	11
3.3	Toelichting verrijkte effectketen	12
3.4	Verrijkte effectketen rivier	13
3.4.1	Toelichting effectketen	13
3.4.2	Huidige procesformulering	15
3.4.3	Benodigde aanpassingen procesformulering	15
3.4.4	Kennisleemtes	16
3.4.5	Ontbrekende meetgegevens voor kalibratie/validatie	17
3.5	Verrijkte effectketen kanaal	17
3.5.1	Toelichting effectketen	17
3.5.2	Huidige procesformulering	18
3.5.3	Benodigde aanpassingen procesformulering	18
3.5.4	Kennisleemtes	18
3.5.5	Ontbrekende meetgegevens voor kalibratie/validatie	18
3.6	Verrijkte effectketen estuarium	18
3.6.1	Toelichting effectketen	18
3.6.2	Huidige procesformulering	19
3.6.3	Kennisleemtes	19
3.6.4	Ontbrekende meetgegevens voor kalibratie/validatie	19
3.7	Verrijkte effectketen meer	19
3.7.1	Toelichting effectketen	20
3.7.2	Huidige procesformulering	20
3.7.3	Benodigde aanpassingen procesformulering	20
3.7.4	Kennisleemtes	20
3.7.5	Ontbrekende meetgegevens voor kalibratie/validatie	20

3.8	Verrijkte effectketen zee	21
3.8.1	Toelichting effectketen	21
3.8.2	Huidige procesformulering	21
3.8.3	Benodigde aanpassingen procesformulering	21
3.8.4	Kennisleemtes	22
3.8.5	Ontbrekende meetgegevens voor kalibratie/validatie	22
4	Visie modelinstrumentarium 2023 voor microplastics	23
4.1	Algemeen	23
4.2	PART geschikt maken voor D-hydro	23
4.3	WAQ-PART koppeling	23
4.4	Toepassing 1: verspreiding in Rijkswateren	24
4.4.1	Algemeen	24
4.4.2	Laag ambitieniveau	25
4.4.3	Gemiddeld ambitieniveau	26
4.4.4	Hoog ambitieniveau	27
4.5	Toepassing 2: ondersteuning bij monitoring microplastics concentratie	27
4.5.1	Algemeen	27
4.5.2	Laag ambitieniveau	27
4.5.3	Gemiddeld ambitieniveau	28
4.5.4	Hoog ambitieniveau	29
4.6	Toepassingen 3-5	29
4.7	Niet meegenomen processen	30
5	Stappenplan verbeteren modellering verspreiding microplastics	31
5.1	Inleiding	31
5.2	Voorstel activiteiten korte termijn (2019)	31
5.2.1	Databehoeft	31
5.2.2	Kennisleemtes	32
5.2.3	Aanpassing software	32
5.2.4	Schematisaties	33
5.3	Voorstel activiteiten middel termijn (2020-2021)	33
5.3.1	Kennisleemtes	33
5.3.2	Databehoeft	34
5.3.3	Schematisaties	34
5.4	Voorstel activiteiten lange termijn (2022-2023)	34
5.4.1	Kennisleemtes	34
5.4.2	Databehoeft	34
5.4.3	Schematisaties	34
5.5	Na 2023	35
5.6	Discussie	35
6	Literatuuroverzicht	37

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Ieder jaar wordt wereldwijd ruim 300 miljoen ton plastic geproduceerd, waarvan naar schatting 1,1 tot 2,4 miljoen ton via rivieren naar de oceaan wordt getransporteerd (LeBreton et al. 2016). De productie van plastics neemt sinds de jaren 1950 toe. Op basis van metingen is geschat dat via de Rijn tussen 20 en 31 ton per jaar de Noordzee bereikt (van der Wal et al. 2015). Omdat plastic deeltjes niet of nauwelijks afbreken, hoopt het plastic afval op in het mariene milieu (LeBreton et al. 2016).

Plastic in het mariene milieu heeft nadelige gevolgen voor het zeeleven. Vogels en zeezoogdieren raken verstrikt in plastic of slikken het in met als gevolg vermagering en zelfs de dood. Daarnaast zijn er mogelijk nadelige gevolgen voor de mens, zoals wanneer zeeproducten worden geconsumeerd die gecontamineerd zijn met microplastics (Barboza et al., 2018). Microplastics (deeltjes of fragmentjes van plastic kleiner dan 5 mm) kunnen ophopen in organismen of opgenomen worden in organen. Microplastics ontstaan na fragmentatie van grotere plastic deeltjes. Een andere bron van microplastics in het oppervlaktewater is directe lozing. De belangrijkste herkomst van deze laatste groep microplastics zijn autobandenslijtsel, slijtsel van wegmarkeringen, plastic kogeltjes en vezels van synthetische kleding (Hann et al. 2018). Deze microplastics worden met de stroming in rivieren en kanalen richting zee getransporteerd.

Hoe transport van microplastics in rivieren, meren en kanalen afhangt van condities, typen plastics (polymeren), de grootte en de vorm van de deeltjes is niet goed bekend. Het afgelopen decennium is het onderzoek over microplastics en het effect op dieren vooral gericht op het mariene milieu. Om ophoping van microplastics in het mariene milieu te voorkomen is kennis en een overzicht nodig van de bronnen en transportroutes in rivieren, meren en kanalen. Hiervoor is het nodig te weten welke processen in de verschillende watersystemen een grote rol spelen. Het is belangrijk om generieke kennis op te bouwen op basis van incidentele metingen, zoals metingen langs de Rijn die suggereren dat microplastics grotendeels in de bovenste 1 m van de waterkolom worden getransporteerd (Mani et al. 2015). Met generieke kennis en een overzicht van bronnen en transportroutes kunnen effectief maatregelen worden genomen om het transport van microplastics naar zee te verminderen.

1.2 Probleemstelling

Een overzicht en kwantificering van bronnen kan worden gegenereerd met een emissiemodel. Routes van microplastics kunnen goed verkregen worden met een model, mits kennis voorhanden is om de belangrijkste fysische en eventueel chemische processen (degradatie) te parametriseren. Meetgegevens uit het veld zijn nodig om het model te kunnen kalibreren en valideren. Ook kan een model gebruikt worden om meetgegevens aan te vullen. Zeker omdat monitoring van de concentratie van microplastics tijdrovend is en een beperking vormt voor het aantal metingen, is het vaak nodig om meetgegevens aan te vullen. Deze aanvulling bestaat uit het verkrijgen van een ruimtelijk dekkend beeld en uit het verkrijgen van een continu beeld in de tijd. Momenteel heeft Rijkswaterstaat geen geschikt modelinstrumentarium voor het simuleren van het transport en de routes van microplastics in het oppervlaktewater waar zij voor verantwoordelijk zijn: de Rijkswateren.

1.3 Doelstelling

Het doel van het EMFZV project is het ontwikkelen van een toepasbare en gestandaardiseerde monitoringstrategie in zoete delen van stroomgebieden, met daarbij optimalisatie en standaardisatie van methoden voor bemonstering en analyse en ontwikkeling van een toegepast modelinstrumentarium voor de Rijn en de Maas. Deze studie is voornamelijk gericht op de modellering.

Het doel van deze studie is om na te gaan welke stappen nodig zijn voor het opzetten van een modelinstrumentarium, waarmee het transport van microplastics in de Rijkswateren gemodelleerd kan worden. Voor microplastics bestaan meerdere definities. Omdat plastic deeltjes kleiner dan 0,05 mm (inclusief nanoplastics) moeilijk waargenomen kunnen worden en hiervoor dus minder goede metingen bestaan, worden deze deeltjes niet meegenomen in deze studie. In het vervolg van deze studie wordt met 'microplastics' bedoeld: deeltjes van plastic met een grootte tussen 0,05 en 5 mm. Voor langgerekte deeltjes zoals vezels wordt met grootte de lengte van de deeltjes bedoeld. Ook macroplastics (>5 mm) worden niet beschouwd in deze studie.

Dit document vormt met het beschrijven van de benodigde stappen een roadmap voor de modelontwikkeling, invullen van kennisleemten en databehoeftes om in 2023 een modelinstrumentarium inzetbaar te hebben. Rijkswaterstaat heeft aangegeven dat dit modelinstrumentarium voor de modellering van microplastics geschikt dient te zijn voor de volgende toepassingen:

1. Het beschrijven van de verspreiding van microplastics in Rijkswateren
2. Het ontwerpen van een monitoringsstrategie, door aan te geven waar (x,y,z) Rijkswaterstaat het best nieuwe vaste monitoringlocaties voor de concentratie van microplastics kan inrichten en door aan te geven op welk tijdstip tijdelijke metingen het best uitgevoerd kunnen worden.
3. Op termijn ondersteuning bij het bepalen van een verzamelstrategie.
4. Op termijn het kwantificeren van microplastics transporten uit Nederlandse bronnen.
5. Op termijn het kwantificeren van effecten van microplastics op de chemische waterkwaliteit en op natuur.

Deze roadmap geeft de benodigde stappen aan om een modelinstrumentarium in te kunnen zetten in 2023 voor de eerste twee toepassingen, waarvoor het doel hieronder is uitgewerkt. De overige 3 toepassingen worden kort aangestipt en worden aangegeven om in beeld te houden dat het modelinstrumentarium op termijn ook voor de toepassingen 3-5 geschikt zal worden gemaakt.

1.3.1 Verspreiding in Rijkswateren

Transport van microplastics in de Rijkswateren leidt tot een verspreiding van microplastics in rivieren, kanalen, estuaria, meren en de zee. Grofweg komen microplastics via de Rijn en Maas Nederland binnen gestroomd. Daarbij komen microplastics die op de Rijkswateren worden geloosd, zoals via uit- en afspoeling van bodems en lozingen vanuit rioolafvalwaterzuiveringslocaties (RWZI's). Met de stroming in de rivier worden ze deels getransporteerd door de Rijntakken en de Maas en een deel blijft waarschijnlijk achter in de bodem. Vervolgens worden de microplastics in de waterkolom deels via de estuaria in de Rijn-Maasmonding en via Zeeland naar de Noordzee getransporteerd. Andere routes naar de Noordzee zijn via het Amsterdam-Rijnkanaal en Noordzeekanaal, en via de IJssel, het IJsselmeer en de Waddenzee.

Rijkswaterstaat wenst het aandeel van het transport van microplastics langs ieder van de routes in de Rijkswateren naar de Noordzee te kennen. Met een set gekoppelde grootschalige hydrodynamische modellen met daarin opgenomen microplastics kan het transport van microplastics in iedere tak worden bepaald. De koppeling bestaat er bijvoorbeeld uit dat resultaten van het Rijntakken model worden doorgegeven naar benedenstroomse grootschalige modellen en vervolgens naar het Noordzee model. Deze roadmap werkt uit hoe de ontwikkeling van een dergelijk instrumentarium eruit zou kunnen zien.

1.3.2 Monitoring van microplastics concentratie

Op dit moment monitort Rijkswaterstaat alleen incidenteel bij Andijk in het IJsselmeer en bij Maassluis in de Rijn-Maasmonding de concentratie microplastics (mogelijk is de ondergrens voor microplastics voor de monitoring gelegd bij 0,3 mm). Bij Lobith in de Boven-Rijn en bij Eijsden in de Maas is ook slechts incidenteel de concentratie bepaald. Vaak zijn de perioden tussen de incidentele metingen op een punt 4 weken. Hiervoor wordt nabij de oever op ongeveer 1 m onder het wateroppervlak met een net een bekende hoeveelheid water gefilterd en wordt het filtraat geanalyseerd op (onder andere) microplastics. Zowel in de ruimte als in de tijd is de resolutie van de metingen beperkt.

Rijkswaterstaat heeft behoefte om op basis van deze metingen en toekomstige vaste metingen op een punt de plastic concentratie gemiddelde over de hele dwarsdoorsnede te bepalen en ook om beter in te kunnen schatten hoe de microplastics concentratie verloopt tussen de metingen door. Bovendien wenst Rijkswaterstaat het gedrag van microplastics concentratie in te kunnen schatten voor het bepalen van nieuwe monitoringlocaties. Met een gedetailleerd hydrodynamisch model inclusief plastic deeltjes kan potentieel de concentratie microplastics worden berekend op een bepaalde plaats (x,y,z) en in de tijd. Op deze manier kunnen de behoeften voor Rijkswaterstaat op termijn mogelijk ingevuld worden. Deze roadmap werkt uit hoe de ontwikkeling van een dergelijk instrumentarium eruit zou kunnen zien.

1.4 Aanpak en uitgangspunten

Voor het opstellen van deze roadmap zijn verschillende stappen doorlopen. Ten eerste is de actuele status van de kennis nodig voor het modelleren van microplastics-transport in de Rijkswateren, de software en modelschematisaties weergegeven. Hoofdstuk 2 geeft deze actuele status weer.

In een brainstormsessie zijn zoveel mogelijk relaties en processen weergegeven die invloed hebben het transport van microplastics. Op basis van dit conceptuele model zijn de belangrijkste processen per watersysteem geselecteerd op basis van expert judgement. Voor de watersystemen rivier, kanaal, estuarium, meer en zee is de doelvariabele bepaald. Het is geverifieerd met Rijkswaterstaat dat de doelvariabele inderdaad het belangrijkste resultaat is voor de toepassingen. De relevante processen voor deze doelvariabele en steunvariabelen zijn weergegeven in een effectketen. Deze methode om duidelijk te krijgen wat nu echt de belangrijkste processen zijn wordt vaker toegepast binnen Kennis Primaire Processen Beheer Onderhoud en Ontwikkeling (KPP BOO) waterkwaliteitsmodelschematisaties. Resultaten staan beschreven in hoofdstuk 3.

De effectketens zijn gebruikt voor het bepalen hoe het instrumentarium eruit zou moeten zien in 2023. Het modelinstrumentarium is voor de toepassingen 1 en 2 aangegeven voor drie alternatieven: passend bij een laag, een gemiddeld en een hoog ambitieniveau. De selectie hiervoor is gebaseerd op inhoudelijke gronden. Mogelijk heeft Rijkswaterstaat andere overwegingen om deze alternatieven aan te willen passen. De verschillende visies staan beschreven in hoofdstuk 4.

In hoofdstuk 5 staan de stappen beschreven om de visies te realiseren. Dit is feitelijk de roadmap. Naast stappen voor de modelontwikkeling geeft deze roadmap ook kennisleemten en databehoeftes aan. In sectie 5.6 wordt kort aangegeven in hoeverre met de aanbevolen stappen het modelinstrumentarium ook toepassingen 3-5 ingezet zal kunnen worden. In sectie 5.6 wordt kort aangegeven of de aangegeven stappen ook afdoende worden geacht voor modellering van kleinere plastic deeltjes (inclusief nanoplastics) en plastic deeltjes groter dan 5 mm.

Voor deze roadmap zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- We zijn uitgegaan van expert judgement voor het opstellen van de effectketens, de visies en de stappen die daarvoor nodig zijn. Gezien de beperkte doorlooptijd van dit project van 3 weken, is geen uitgebreide literatuurstudie uitgevoerd.
- Voor de voorgestelde uitwerking van het instrumentarium is zoveel mogelijk de samenhang met de beoogde structuur van de watermodellen voor 2023 in acht genomen. Om deze reden zijn onderzoeksmodellen die ontwikkeld worden aan universiteiten (WUR; TRAMP project en TU Delft; NWA proposal) niet meegenomen.

2 Bestaande kennis, software en modelschematisaties

2.1 Kennisbasis

2.1.1 Korte samenvatting relevante projecten

CleanSea:

Toepassing van Delft3D-PART op de verspreiding van plastic in de Noordzee
 Technische details: valsnelheid op basis van dichtheidsverschil, grootte en vorm van het plastic. Formule volgens Stokes. Als bronnen zijn de grote rivieren genomen. Onderliggende hydrodynamica: 3D-model van de Noordzee. Geen expliciete interactie met de bodem (sedimentatie/erosie).
 Vergelijking met waarnemingen bleek niet mogelijk, omdat er veel te weinig waarnemingen waren. (Zie: van der Meulen en Vethaak, 2015)

Noordzeekanaal:

Opnieuw een toepassing van Delft3D-PART, ditmaal betrof het drijvend plastic. Hiervan is een animatie beschikbaar.
 (Contactpersoon: Dana Stuparu)

Rotterdamse havens:

Toepassing van Delft3D-PART op dit havengebied.
 (Contactpersoon: Clara Chrzanowski)

Ocean Cleanup:

Pilot voor het plaatsen van de “barriers” uit dit wereldwijde project. Gebied: Tsushima, Japan. Het idee is/was om vast te stellen waar je het beste de drijvers en de armen kan neerleggen. Het plastic wordt doorzeestromingen aangevoerd uit China en Korea. Ook dit keer Delft3D-PART (voor dit project zijn de “booms” ontwikkeld.)

ETRMA:

Transport van “tire and roadware particles” (bandenslijtsel) van de bron naar de Noordzee voor twee stroomgebieden – Schelde en Seine. Aanpak: zes grootteklassen als aparte stoffen, vijf grootteklassen voor zwevende stof en verder combinaties van beide om aggregatie te beschrijven. Uiteindelijk enkele tientallen stoffen om alle grootteklassen te kunnen onderscheiden.
 Processen in detail geïmplementeerd om zoveel mogelijk realisme te kunnen inbouwen. Validatie tegen (schaarse maar bruikbare) meetgegevens.
 (Zie artikelen Unice et al. 2018, delen I en II)

Inventarisatie bronnen van plastic in het stroomgebied van de Rijn:

In dit geval is Delft3D-WAQ gebruikt in combinatie met een SOBEK-model. Verschillende soorten plastic zijn onderscheiden, niet perse microplastics. Voornaamste proces: eerste-orde afbraak als simpel model voor aanlanding.
 (Stageproject Caterina Zillien, zie Zillien, 2018)

Plasticverspreiding op wereldschaal

Met een wereldwijd model op basis van D-FLOW_FM en de optie daarin om deeltjes te traceren wordt geprobeerd de verspreiding van plastic op globale schaal te voorspellen.
 (Dit project is nog maar net van start gegaan. Contactpersoon Martin Verlaan)

Guanabara Bay (Brazilië)

Operationeel model van de Guanabara Bay om schoonmaakboten aan te sturen. Op basis van Delft3D-PART wordt voorspeld waar zich de meeste plastic ophoopt. Er wordt gekeken naar het effect van wind op de verspreiding van (drijvend) plastic. (Dit model is ontwikkeld voor de Olympische Spelen van Rio de Janeiro; zie Deltares, 2015)

Laboratoriumonderzoek

Onderzoek naar de effecten van microplastics op sediment en andersom. Uit de experimenten is gebleken dat ze elkaar beïnvloeden – dit blijkt uit duidelijke verschillen in sedimentatiesnelheden. De resultaten zijn echter niet eenduidig.

Uit beperkte numerieke experimenten met het RMM-model is gebleken dat je een fijnmazig model nodig hebt om de binnendringing van slib en plasticdeeltjes in de havens goed te beschrijven.

(Onderzoek uitgevoerd door twee stagiairs, Sadjad Alawy en Michiel Blok)

2.1.2 Korte duiding relevante artikelen

- Besseling et al (2017) beschrijven de modellering van microplastics als deeltjes met het NanoDufLOW-model. Gemodelleerde processen zijn advectie, homo- en heteroaggregatie, sedimentatie, resuspensie, polymeerdegradatie, aanwezigheid van biofilm en begraving. De aggregatie wordt gemodelleerd met een balans aanpak.
- Nizzetto et al. (2016) beschrijft het transport van microplastics in rivieren en hun stroomgebieden en het achterblijven van microplastics in de bodem.
- Unice et al. (2018a,b) hebben Nizzetto et al. (2016) gebruikt voor procesformuleringen. Deze twee artikelen beschrijven het vrijkomen van autobandenslijtsel (tire and road wear particles) via verkeer. Hun werk omvat een emissie- en transportmodel, gebaseerd op E-Hype en DELWAQ. De processen zijn vormgegeven naar o.a. Besseling et al. (2017). De deeltjes zijn voor de modellering van de aggregatieprocessen onderverdeeld in afzonderlijke klassen.
- Stuparu et al. (2015) hebben een transportmodel voor drijvend plastic in de Noordzee beschreven. Drijvend plastic is onder meer onderhevig aan invloed van de wind.
- Zada et al. (2018) beschrijven onderzoek naar geschikte meetmethoden voor microplastics. Het grote probleem is ze te herkennen in een natuurlijk water- of sedimentmonster, waar veel ander materiaal in kan zitten.

2.1.3 Definitie relevante processen

Bij het transport van microplastics in de waterkolom zijn de volgende processen bepalend:

1. *Advectie*: Transport van microplastics met de stroming mee.
2. *Sedimentatie*: Bezinken van een plastic- of sedimentdeeltje op de bodem vanuit de waterkolom; is afhankelijk van de grootte, dichtheid en vorm van de deeltjes of de vlokken (aggregaten)
3. *Resuspensie*: het opnieuw in suspensie komen in de waterkolom van microplastics en sedimentdeeltjes door stroming en golven.
4. *Aanlanding*: plastic blijft achter op de oevers, achter obstakels en in vegetatie en hoopt daar op. Vermoedelijk vooral van belang voor grotere stukken plastic, maar mogelijk ook voor microplastics.
5. *Ingestie*: inname door organismen zoals vissen, bodemdieren en mosselen.
6. *Excretie*: uitscheiden van microplastics door organismen zoals vissen, bodemdieren en mosselen. Wanneer dit proces kleiner is dan ingestie, hopen microplastics op in deze waterdieren (reservoir biota) en kunnen uiteindelijk in de voedselketen terecht komen.

Processen die effect hebben op de dichtheid en andere eigenschappen van de microplastics en daarmee op de sedimentatie en resuspensie zijn:

7. Aggregatie met zwevende stof (*hetero-aggregatie*): leidt tot vlokken van verschillende grootte en samenstelling. Kenmerk: de valsnelheid neemt doorgaans toe na aggregatie.
8. Aggregatie met andere microplastic-deeltjes (*homo-aggregatie*): leidt tot vlokken van verschillende grootte, maar met een homogene samenstelling (afgezien van de mogelijkheid van verschillende typen plastic). Kenmerk: valsnelheid neemt (enigszins) toe.
9. *Biofouling*: vorming van een laag biologisch materiaal op de plasticdeeltjes waardoor de eigenschappen (dichtheid, grootte, valsnelheid) kunnen veranderen. Door de plakkerigheid kan dit ook gevolgen hebben voor aggregatie.
10. *Veroudering*: Onder invloed van UV-licht en het uitlogen van additieven wordt het plastic brozer; Hieronder valt ook biofouling en de adsorptie van hydrofobe stoffen vanuit het water. Veroudering is ten dele hetzelfde als degradatie.
11. *Degradatie*: verandering van het oppervlakte van een plastic deeltje onder invloed van afbraakprocessen door micro-organismen, UV-licht en fysische krachten (zoals door golfslag en door botsing met stenen of de bodem). Degradatie is ten dele hetzelfde als veroudering.
12. Fragmentatie: het uiteenvallen van een plastic deeltje in kleinere deeltjes door mechanische afbraak. Fragmentatie van een plastic deeltje groter dan 5 mm resulteert mogelijk in meerdere microplastics.

Processen die de uitwisseling tussen de mobiele en immobiele bodemlagen bepalen zijn:

13. Bioturbatie: Omwoelen van de bodem door bodemleven (benthos). Microplastics kunnen hierdoor van de mobiele bodem in de immobiele bodem terecht komen, en weer terug.
14. Omwoeling: Een vergelijkbaar effect als door bioturbatie kan worden veroorzaakt door bodemtransport als gevolg van verplaatsing van duinen en ribbels maar ook bijvoorbeeld bodemberoerende visserij of baggeren en storten.

Deze processen spelen allemaal een belangrijke of een juist minder belangrijke rol. Dit wordt later uitgewerkt in conceptuele modellen en effectketens.

2.1.4 Aandachtspunten modellering

Behalve dat we niet altijd goed begrijpen hoe deze processen in zijn werk gaan, wat het modelleren op zich al lastig maakt, is er ook het probleem dat de uitwerking van de processen moeilijkheden levert. Om een voorbeeld te geven:

Een populaire manier om microplastics te modelleren is door middel van populatiebalansen (zie o.a. Besseling et al. 2017). Je onderscheidt dan deeltjes (of aggregaten van deeltjes) in een aantal grootteklassen. Die deeltjes kunnen met elkaar in contact komen en nieuwe deeltjes – van een andere grootte – vormen. Zolang het om een soort materiaal gaat, bijvoorbeeld zwevende stof, krijg je een enkele reeks van klassen, die je om praktische redenen moet begrenzen. Maar als het om combinaties van materialen gaat, zou je iedere mogelijke samenstelling moeten onderscheiden – een aggregaat met een deeltje zwevende stof en een deeltje microplastic, een aggregaat met twee deeltjes zwevende stof en een deeltje microplastic, maar ook een met een deeltje zwevende stof en twee deeltjes

microplastic enzovoort. Dit levert al snel een enorm aantal typen aggregaten op en hoewel je daar weer slimme trucs voor kunt bedenken, wordt het er niet eenvoudiger op. (Voor het project rond autobandslijtsel voor de ETRMA hebben we zo'n 36 verschillende stoffen onderscheiden om dit te modelleren.)

Processen waarbij het gaat om de verandering van de eigenschappen van een deeltje, zoals veroudering en biofouling, leveren weer andere moeilijkheden op. Je moet dan weten hoe lang een deeltje in het water is geweest en dat werkt niet goed met een concept waarin de massaconcentratie wordt bijgehouden. Daarvoor biedt een deeltjesmodel betere mogelijkheden.

Het belangrijkste punt van zorg t.a.v. de modellering is momenteel vermoedelijk het gebrek aan referentiemateriaal – er zijn maar weinig betrouwbare meetgegevens van microplastics in het milieu – en de onzekerheden die rond de emissies hangen.

2.2 Procesbeschrijving software

2.2.1 Inleiding

Grofweg zijn er twee benaderingen mogelijk:

- 1 Plastics benaderen als losse deeltjes die door de stroming worden meegenomen en die allerlei processen ondergaan. De deeltjesaanpak van Delft3D-PART is daarvan een voorbeeld, hoewel een deeltje in PART feitelijk staat voor een verzameling deeltjes, niet voor alle plastics afzonderlijk.
- 2 Plastics benaderen als een (al dan niet) opgeloste stof die processen ondergaat. Dit is de aanpak van Delft3D-WAQ (of D-Water Quality in zijn algemeenheid)

2.2.2 WAQ en PART

De belangrijkste grondbeginselen voor WAQ en PART worden hieronder puntsgewijs aangegeven en samengevat in Tabel 2.1.

WAQ:

- Het resultaat is massabalans en concentratie per segment (rekencel) .
- De rekeninspanning is gekoppeld aan het aantal segmenten.
- Resultaten worden altijd bepaald op het rekenrooster van de hydrodynamica (ruimtelijke resolutie wordt daardoor bepaald)
- Mogelijk om gedetailleerde en complexe processen tussen stoffen te modelleren, zoals de interactie met zwevende stof.

PART:

- Het resultaat is de paden van “rekendeeltjes”. De concentraties worden afgeleid uit de massa van de rekendeeltjes per segment (rekencel) in het uitvoerrooster.
- De rekeninspanning is gekoppeld aan het aantal rekendeeltjes.
- Resultaten zijn in principe onafhankelijk van het rooster (ruimtelijke resolutie kan fijner zijn dan het hydrodynamische rooster)
- De huidige implementatie is beperkt tot gestructureerde roosters: PART kan niet gekoppeld worden aan SOBEK of D-FLOW-FM
- Alleen relatief eenvoudige processen worden gemodelleerd, maar je kunt wel geschiedenis meenemen (veroudering).
- Processen waarin “buoyancy” van materiaal een rol speelt zijn gemakkelijk(er) te implementeren dan in WAQ

Tabel 2.1 Overzicht van de huidige mogelijkheden voor het modelleren van de concentratie microplastics met de module WAQ en de deeltjesmodule PART

Proces	WAQ	PART
Aanlanding	Ja	Ja
Aggregatie met zwevende stof	Ja	Nee
Aggregatie onderling	Ja	Nee
Bezinking	Ja	Ja
Erosie	Ja	Ja
Veroudering (biofouling e.d.)	Nee	Ja
Transport door stroming	Ja	Ja
Buoyancy	Moeizaam	Ja
Cotransport (verontreinigingen gehecht aan plastics)	Ja	Nee (wel in combinatie met WAQ)
Type watersysteem	WAQ	PART
Rivier	Ja	Nee voor SOBEK; Ja voor 2D/3D model)
Kanaal	Ja	Idem
Meer	Ja	Ja
Estuarium	Ja	Ja
Zee	Ja	Ja
Kustgebied	Ja	Ja
Ruimte- en tijdschaal	WAQ	PART
< 1 km en enkele uren (pluimen en diffusors e.d.)	Nee	Ja
Enkele km, enkele dagen	Ja	Ja
> 100 km, maanden tot vele jaren	Ja	Kan, maar maximaal hanteerbaar aantal deeltjes is beperkend

2.2.3 Keuze tussen WAQ en PART per toepassing

Beide benaderingen zijn toegepast en feitelijk zijn de verschillen van technische aard, niet van principiële:

- 1) De deeltjesbenadering in PART maakt het mogelijk om “subgrid”-effecten te zien.
- 2) In PART treedt minder numerieke diffusie op dan in WAQ.
- 3) De stofbenadering in WAQ maakt sommige typen processen eenvoudiger te implementeren. Dit geldt bijvoorbeeld voor de interactie met zwevende stof. (De reden hiervoor is dat in WAQ alle stof verdeeld is over het segment, zodat de interactie beschreven kan worden met de concentraties in het segment. Bij PART daarentegen moet de afstand tussen deeltjes bepaald worden voordat bepaald kan worden of ze - binnen een tijdstap – dicht genoeg in elkaars buurt zijn om interactie te vertonen. Dit vergt veel extra werk en je moet ook een realistisch model hebben voor het concept van “dicht genoeg in elkaars buurt”.)
- 4) Een voordeel van PART ten opzichte van WAQ is dat je elk deeltje zijn eigen eigenschappen kunt geven. In WAQ moet je meerdere stoffen onderscheiden als je verschillende grootteklassen wilt modelleren.

- 5) Delft3D-PART stelt eisen aan het onderliggende hydrodynamische model, terwijl Delft3D-WAQ/D-Water Quality daarin heel flexibel is. Merk op dat op dit moment PART nog niet met ongestructureerde roosters (roosters waarin andere vormen dan rechthoeken voorkomen) om kan gaan. Dit is een belangrijke beperking, omdat we met de 6^{de}-generatiemodellen (vrijwel) uitsluitend ongestructureerde roosters zullen gebruiken.

2.3 Modelschematisaties

Er zijn geen modelschematisaties opgenomen in de modellenbibliotheek (helpdesk water) voor het modelleren van (micro)plastics.

Enkele modellen die eerder zijn gebruikt voor het simuleren van microplastics transport in Nederland zijn:

1. Delft3D-FLOW_Noordzee-ZUNO-grof_j03-10_v01 (voor het CLEANSEA project)
2. Delft3D-FLOW_Noordzee-ZUNO-DD_noMV2_j03-11_v02 in de Noordzee (vervolg CLEANSEA in het kader van voorbereiding publicatie)
3. Delft3d-nzk_ark-j13_5-v1 (3D model Noordzeekanaal)
4. SIMONA OSR-NSC Grof, een 3D model voor de Rotterdamse Haven.

3 Van conceptueel model naar benadering volgens een effectketen

3.1 Inleiding: doelvariabele

In deze roadmap is gekozen om op basis van een conceptueel model en in overleg met RWS/WVL, de doelvariabele 'concentratie microplastics in de waterkolom' als doelvariabele te kiezen. Besloten is om de toepassingen 'het in kaart brengen van de verspreiding van microplastics in Rijkswateren (Toepassing 1)' in eerste instantie te adresseren. Een belangrijke reden om de effectketens alleen uit te werken voor Toepassing 1 is ook dat de effectketens op meerdere lagen uitwerken onoverzichtelijk zou worden.

Voor toepassing 1 is gewenst dat de berekende concentratie daggemiddeld en jaargemiddeld voldoende nauwkeurig is. Voor toepassing 2 is gewenst dat dat uurgemiddelden voldoende nauwkeurig zijn. Zeker voor gebieden beïnvloed door getij is deze tijdstap van een uur maximaal.

In de toekomst is het van belang dat de modellering van microplastics meerdere toepassingen kent. Dit betekent ook dat de doelvariabele aangepast zou moeten worden. Bovendien is nu gekozen om voor 'concentratie microplastics in de waterkolom' de eenheid 'g/m³' te geven. In de modellering is het echter mogelijk om deze eenheid om te rekenen van een concentratie naar een hoeveelheid deeltjes. Dit laatste sluit beter aan bij de toepassing om naar effecten van microplastics op de natuur te kijken.

Om microplastics in de waterkolom in kaart te brengen moeten een aantal processen worden meegenomen. In de Meerjarenagenda van KPP BOO Waterkwaliteitsmodelschematisaties is in het kader van 'Good Modelling Practice' een aanpak uitgewerkt waarbij op basis van het conceptuele model verrijkte effectketens worden gemaakt. Deze ketens worden in dit hoofdstuk verder toegelicht.

3.2 Conceptueel model

In deze paragraaf wordt het conceptuele model weergegeven (Figuur 3.1) dat als basis dient voor de effectketens en de verdere uitwerking van de modelschematisatie in dit document.

Conceptueel model

Welke factoren zijn van belang voor de verspreiding van microplastics?



Figuur 3.1 Conceptueel model waarbij de relaties die van belang zijn voor de verspreiding van microplastics in het aquatische milieu worden weergegeven. Hierin worden ook elementen weergegeven die van belang zijn voor de effecten van microplastics op het milieu (toepassing 4).

In dit conceptuele model worden de relaties tussen de verschillende elementen van het aquatische milieu en de verspreiding van microplastics weergegeven. Hierin wordt geen onderscheid gemaakt tussen belangrijke of minder belangrijke relaties, of de onzekerheden die gepaard gaan met deze relaties. Deze zijn in de effectketens in de volgende paragrafen wel meegenomen. Ook zijn deze effectketens uitgesplitst per type milieu: rivier, kanaal, meer, zee en estuarium.

3.3 Toelichting verrijkte effectketen

Een verrijkte effectketen wordt gebruikt in het ontwikkelen van modellen binnen het huidige modelinstrumentarium KPP BOO Waterkwaliteitsmodelschematisaties. Hierin wordt de relatie van de doelvariabele, in dit geval 'microplastics in de waterkolom', met de meest cruciale ondersteunende variabelen weergegeven. Hierbij worden de processen die van belang zijn voor de oorzaak-effect relatie genoemd. Ook wordt de mate van zekerheid van de oorzaak-effect relatie en de mate van belang van de oorzaak-effect relatie aangegeven. Tot slot wordt er voor elke variabele of parameter de volgende informatie weergegeven (Figuur 3.2).

Data voor kalibratie/validatie	
Data	Geen data
Data	Onvoldoende data
Data	Redelijk
Data	Voldoende

Modelonzekerheid	
Model	Onbekend
Model	Onzeker / Gevoelig
Model	Redelijk zeker
Model	Zeker / Ongevoelig

- Per oorzaak-effectrelatie mate van zekerheid aangeven (kleur)



- Per oorzaak-effectrelatie mate van belang aangeven (dikte)

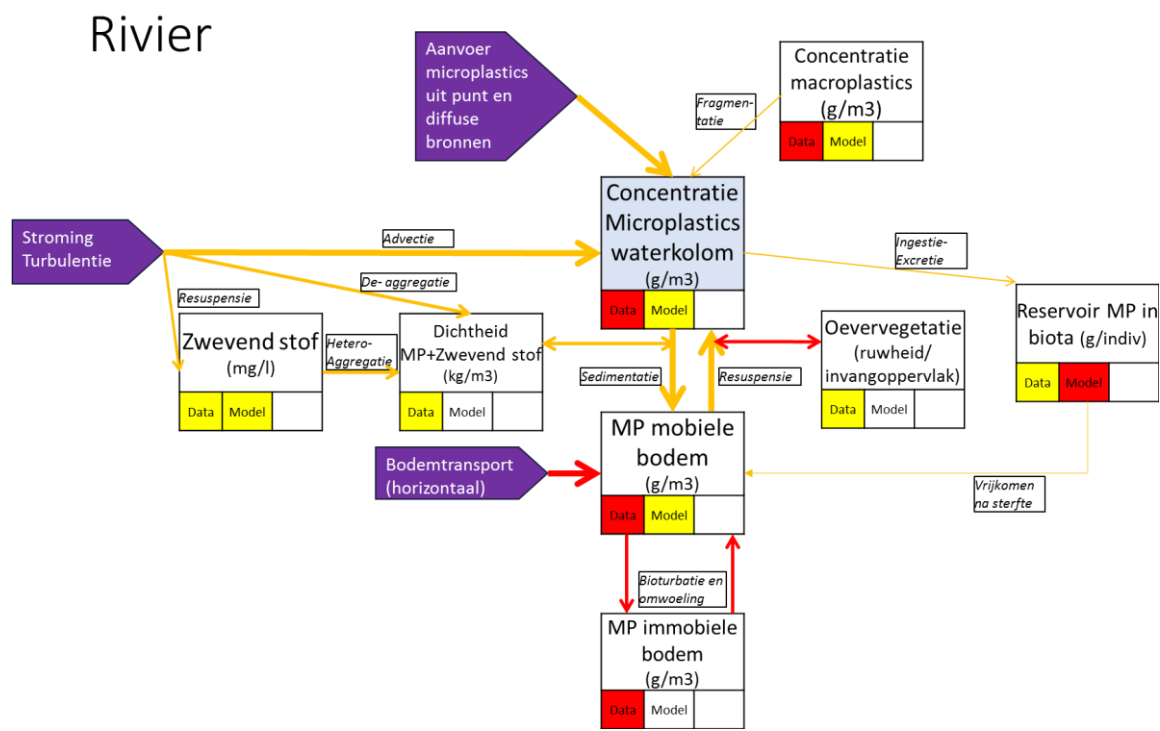


Figuur 3.2 Weergave van de databeschikbaarheid (boven), mate van 'modelonzekerheid' van de variabelen en/of parameters (midden) in de verrijkte effectketen en de mate van zekerheid en belang van de oorzaak-effectrelatie (onder).

3.4 Verrijkte effectketen rivier

3.4.1 Toelichting effectketen

In het riviermilieu zijn externe processen zoals stroming en turbulentie van belang. De microplastics worden in de waterkolom gebracht via diffuse bronnen en puntbronnen (Figuur 3.3). Een voorbeeld van een puntbron is een riolafvalwaterzuivering en een voorbeeld van een diffuse bron is aanvoer van microplastics via het grondwater, welke op riviertrajecten relevant kan zijn.



Figuur 3.3 Verrijkte effectketen microplastics modellering in rivieren. MP = microplastics

Stroming en turbulentie zijn van groot belang voor de advectie van microplastics en hun uiteindelijke verspreiding in de waterkolom. De relatie tussen deze variabelen en de advectie van microplastics in de waterkolom is gemiddeld zeker. Ook de relatie tussen de aanvoer van microplastics uit diffuse bronnen en puntbronnen en microplastics in de waterkolom is gemiddeld zeker. De relatie tussen stroming en turbulente via resuspensie op zwevend stof is van klein belang met een gemiddelde zekerheid. Ditzelfde geldt voor de processen aggregatie en de-aggregatie die een effect hebben op de dichtheid van de microplastics en het zwevend stof. Hierbij gaat het om processen die voortdurend zijn. Een eenmalige activiteit als baggeren verhoogt de concentratie zwevende stof en mogelijk ook de concentratie microplastics, maar is niet meegenomen in de effectketen vanwege de korte duur.

De relatie tussen microplastics in de mobiele bodem en microplastics in de waterkolom wordt gestuurd door sedimentatie en resuspensie. Beide processen zijn van gemiddeld belang en de relatie tussen microplastics in de waterkolom en mobiele bodem zijn gemiddeld zeker. Oevervegetatie is hier als steunvariable opgenomen, omdat dit een gemiddeld belangrijke, onzekere relatie heeft met de sedimentatie en resuspensie van microplastics van en naar de mobiele bodem. Het horizontale bodemtransport is van groot belang voor de microplastics in de mobiele bodem en deze relatie is onzeker. De microplastics in de mobiele bodem worden via bioturbatie waarschijnlijk uitgewisseld met de microplastics in de immobiele bodem. Deze relatie is onzeker en van gemiddeld belang.

De laatste steunvariabele die een effect heeft op microplastics in de waterkolom in rivieren is het reservoir van microplastics in biota. Dit reservoir ontstaat wanneer via ingestie meer microplastics uit de waterkolom gehaald worden dan uitgescheid wordt via excretie. Wanneer het dier dood gaat komt het meeste van de microplastics terecht in de mobiele bodem. Met name de kleinere microplastics (en ook nanoplastics) kunnen in biota achterblijven en concentreren in het lichaam, zoals bijvoorbeeld in filterfeeding schelpdieren. De relaties tussen het opslaan van microplastics door organismen (biota reservoir) en microplastics in de waterkolom is van gemiddeld belang en gemiddelde zekerheid en afhankelijk van de productiviteit van het waterlichaam. Voor estuaria en de zee is het belang groter dan in kanalen en rivieren. Ook voor het biota reservoir in de mobiele bodem is het belang gemiddeld (o.a. Hardesty et al., 2017).

3.4.2 Huidige procesformulering

Op dit moment kunnen we in het deeltjesmodel PART microplastics in de waterkolom in rivieren modelleren op basis van de grootte en dichtheid, volgens de Stoke's vergelijking voor een sferisch deeltje. De valsnelheid kan nog voor de vorm van het deeltje worden gecorrigeerd. De bezinking van microplastics bepaalt welk deel in de waterkolom aanwezig blijft en welk deel in de bodem terecht komt. Daarmee heeft het proces bezinking een belangrijke invloed op de hoeveelheid deeltjes in de waterkolom, en dus op de doelvariabele 'concentratie microplastics in de waterkolom'. Stroming en turbulentie worden bij bezinking meegenomen. Bij de modellering wordt stroming berekend met een hydrodynamisch model.

Naast dichtheid van de microplastics zijn er in PART geen andere steunvariabelen uit de verrijkte effectketen opgenomen. Voor het algemene waterkwaliteitsmodel zijn een aantal processen opgenomen en toegepast (in een model van de Seine) op deeltjes van bandenslijpsel, zoals netto sedimentatie, afbraak, heteroaggregatie met zwevende stof. De laatste twee processen werden gemodelleerd als een (pseudo) eerste order proces (Unice et al., 2018). De andere processen die in de verrijkte effectketen worden weergegeven zijn niet opgenomen in de huidige modellering van microplastics in rivieren.

3.4.3 Benodigde aanpassingen procesformulering

In het huidige modelinstrumentarium zijn de procesbeschrijvingen beperkt. In PART missen met name de processen die de valsnelheid van plastic beïnvloeden, zoals veroudering, biofouling, degradatie en fragmentatie. Ook is de interactie met de bodem niet aanwezig. Voor het algemene waterkwaliteitsmodel zijn voor bandenslijpseldeeltjes wel processen in WAQ opgenomen, maar daarbij ging het om special versie van WAQ. Het dient nagegaan te worden of deze processen in de hoofdversie zijn opgenomen. Alle data en modelparameters zijn gevalideerd (voor zover mogelijk) met data vanuit de Seine. Voor een uitbreiding naar de Nederlandse wateren kunnen de procesbeschrijvingen zelf wel voor een groot deel worden gehanteerd en uitgebreid met processen die niet zijn opgenomen, maar het bepalen van de procesparameters maken een uitgebreide validatie voor de Nederlandse situatie noodzakelijk.

Op dit moment is er ook geen voldoende koppeling tussen het deeltjesmodel PART en het algemene model WAQ, waarbij de kracht van beide systemen bij elkaar komen.

3.4.4 Kennisleemtes

Er worden een aantal kennisleemtes geïdentificeerd om de relaties en processen in de verrijkte effectketen voor rivieren verder te kwantificeren. Kennisleemtes kunnen gaan over gebrek aan kennis over de processen van belang voor het bepalen van het transport van microplastics, gebrek aan kennis over de fysische of chemische eigenschappen van microplastics en over het verband van de processen en eigenschappen met condities. Hierbij is een volgorde aangebracht op basis van de belangrijkheid van de relatie in het bepalen van de uiteindelijke verspreiding van microplastics in de waterkolom. Daarnaast is begonnen met de relaties die het meest zeker zijn. In de volgende sectie wordt ingegaan op de ontbrekende data.

Belangrijke relaties met een gemiddelde zekerheid:

- 1 Bij welke kritieke bodemschuifspanning wordt resuspensie van microplastics tot stand gebracht?
- 2 Wat is de uitwisseling tussen waterkolom en oever voor verschillende condities?
- 3 Hoe beïnvloedt vegetatie sedimentatie en resuspensie?

Gemiddeld belangrijke relaties met een gemiddelde zekerheid:

- 4 Onder welke condities aggregeren microplastics met zwevend stof en in welke mate?
- 5 Onder welke condities de-aggregeren microplastics met zwevend stof?
- 6 Bij welke dichtheid van microplastics en zwevend stof sedimenteren deze deeltjes van de waterkolom naar de mobiele bodem?
- 7 Bij welke dichtheid van microplastics en zwevend stof komen deze deeltjes op van de mobiele bodem in suspensie in de waterkolom?

Gemiddeld belangrijke relaties met een kleine zekerheid:

- 8 Welke fractie van de microplastics worden via bioturbatie uitgewisseld tussen de mobiele en immobiele bodem?
- 9 Wat is de rol van oevervegetatie in de sedimentatie en resuspensie van microplastics in rivieren? En bij welke verhouding tussen vegetatiebedekking en rivier treedt er een effect op?
- 10 Wat is de fragmentatiesnelheid van plastic deeltjes onder water naar microplastics afhankelijk van condities, zoals stroomsnelheid, golven en de directe omgeving (stenen, zandige bodem, in waterkolom)?
- 11 Wat is de fragmentatiesnelheid van plastic deeltjes boven water in bijvoorbeeld uiterwaarden naar microplastics onder invloed van UV-licht?

Relaties van klein belang met een gemiddelde zekerheid:

- 12 Onder welke condities worden microplastics vanuit de waterkolom in organismen opgeslagen?
- 13 Onder welke condities worden microplastics vanuit de mobiele bodem in organismen opgeslagen?

3.4.5 Ontbrekende meetgegevens voor kalibratie/validatie

Er is gebrek aan data voor het kalibreren en valideren van een aantal belangrijke ondersteunende variabelen en de doelvariabele zelf.

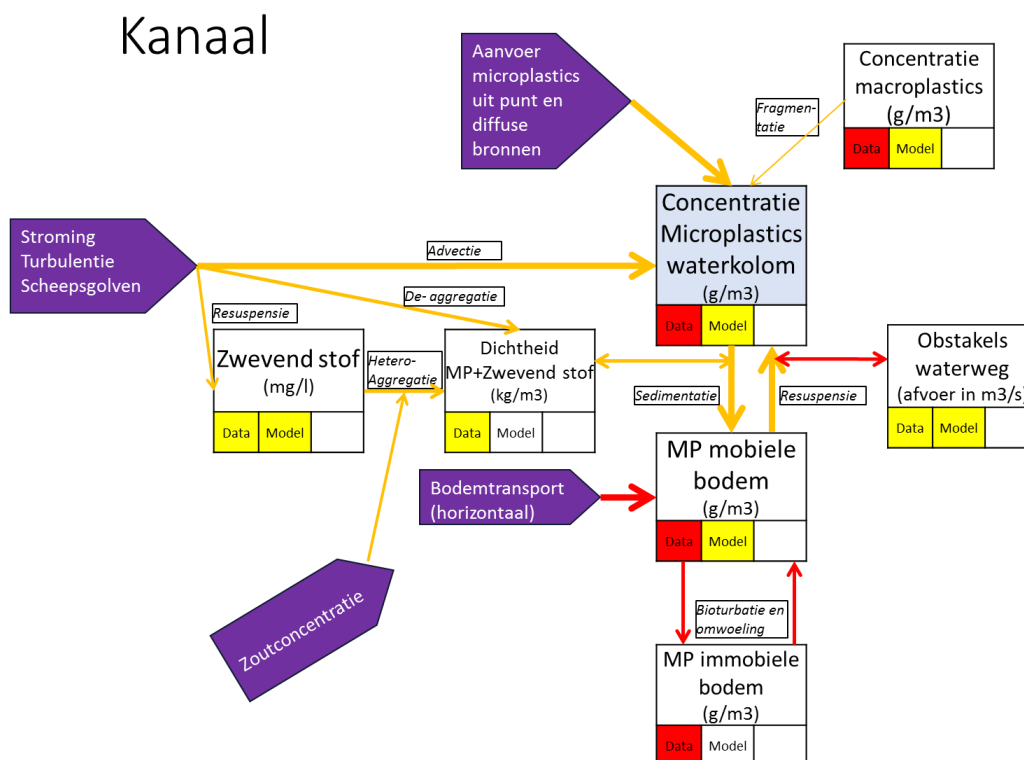
- Wat is de aanvoer van microplastics vanuit rivieren en het mariene milieu?
- Hoeveel microplastic deeltjes zitten er in de waterkolom?
- Hoeveel microplastic deeltjes zitten er in de mobiele bodem (bodem reservoir)?
- Hoeveel microplastic deeltjes uit de waterkolom en de bodem komen er via ingestie in organismen terecht en worden in deze organismen vastgehouden (biota reservoir)?
- Hoeveel microplastics worden er gevonden in en voor oevervegetatie?

3.5 Verrijkte effectketen kanaal

In dit hoofdstuk worden alleen de veranderingen ten opzichte van de eerdere effectketens weergegeven om herhaling te voorkomen.

3.5.1 Toelichting effectketen

In het kanalen zijn externe processen zoals stroming, turbulentie en ook scheepsgolven van belang (Figuur 3.4).



Figuur 3.4 Verrijkte effectketen microplastics modellering in kanalen (met zoutindringing). MP = microplastics

Naast stroming en turbulentie zoals bij rivieren, zijn bij kanalen ook scheepsgolven van groot belang voor de advectie van microplastics en hun uiteindelijke verspreiding in de waterkolom. Daarnaast is de relatie tussen zoutconcentratie en hetero-aggregatie van zwevend stof en microplastics van gemiddeld effect met een gemiddelde zekerheid. Ook is er een gemiddeld belangrijk effect van obstakels in de waterweg op sedimentatie en resuspensie van microplastics.

3.5.2 Huidige procesformulering

Deze is hetzelfde als voor rivieren, zie sectie 3.4.2. Voor systemen die met een 1D model zijn beschreven is een deeltjesmodel niet geschikt, terwijl het waterkwaliteitsmodel hier wel mee overweg kan.

3.5.3 Benodigde aanpassingen procesformulering

In het deeltjesmodel kan de dichtheid en grootte van een deeltje beter worden beschreven en tijdsafhankelijk worden gemaakt. Dit betekent dat de verouderingsprocessen, en biofouling in het model moeten worden opgenomen. Verouderingsprocessen en biofouling worden ook beïnvloed door het omgevingswater en een koppeling met het waterkwaliteitsmodel is dan noodzakelijk om deze processen in PART nauwkeuriger te kunnen beschrijven. In het water kwaliteitsmodel kunnen de processen die voornamelijk als een eerste orde proces in het model zijn opgenomen verder worden uitgewerkt, zoals een goede beschrijving van het sedimentatie en erosieproces en het effect van plastics op aggregatie en sedimentatie van zwevende stof.

3.5.4 Kennisleemtes

Er worden een aantal kennisleemtes geïdentificeerd de relaties en processen in de verrijkte effectketen voor kanalen verder te kwantificeren.

Gemiddeld belangrijke relaties met een gemiddelde zekerheid:

- 14 Bij welke zoutconcentratie treedt er hetero-aggregatie van zwevend stof en microplastics op?
- 15 Wat is het effect van obstakels in de waterweg op resuspensie en sedimentatie van microplastics?

3.5.5 Ontbrekende meetgegevens voor kalibratie/validatie

Er is gebrek aan data voor het kalibreren en valideren van een aantal belangrijke ondersteunende variabelen en de doelvariabele zelf.

- Hoeveel microplastics worden er gevonden voor en na obstakels in de waterweg?

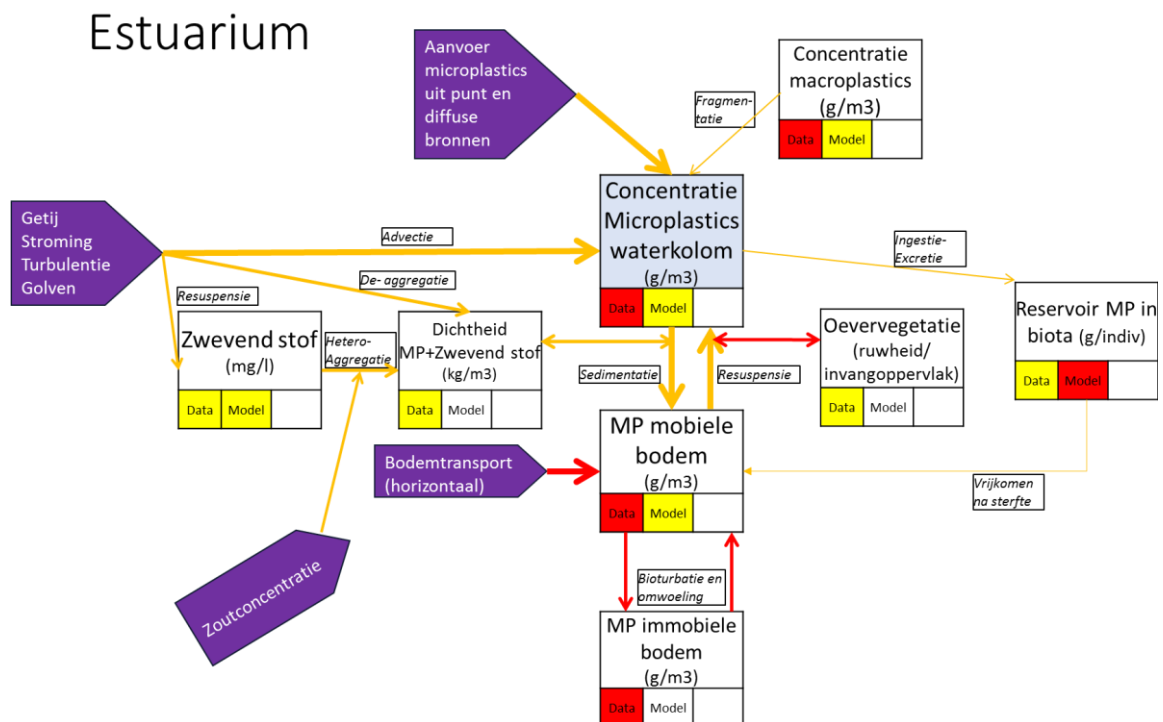
Daarnaast zijn de ontbrekende meetgegevens die relevant zijn voor de andere milieus; hoeveel microplastics worden in waterkolom gevonden, hoeveel in de mobiele bodem, etc. ook relevant voor kanalen.

3.6 Verrijkte effectketen estuarium

In dit hoofdstuk worden alleen de veranderingen ten opzichte van de eerdere effectketens weergegeven om herhaling te voorkomen.

3.6.1 Toelichting effectketen

In Figuur 3.5 wordt de verrijkte effectketen van de verspreiding van microplastics in de waterkolom van een estuarium weergegeven.



Figuur 3.5 Verrijkte effectketen microplastics modellering in estuaria. MP = microplastics

In deze gebieden zijn strooming, turbulentie, golven en ook getij van groot belang voor advectie. Dit is de enige aanvulling ten opzichte van eerdere effectketens.

3.6.2 Huidige procesformulering

Deze is hetzelfde als voor rivieren, zie sectie 3.4.

3.6.3 Kennisleemtes

Er worden een aantal kennisleemtes geïdentificeerd de relaties en processen in de verrijkte effectketen voor estuaria verder te kwantificeren. Hierbij is een volgorde aangebracht op basis van de belangrijkheid van de relatie in het bepalen van de uiteindelijke verspreiding van microplastics in de waterkolom. Daarnaast is begonnen met de relaties die het meest zeker zijn. In de volgende sectie wordt ingegaan op de ontbrekende data.

Belangrijke relaties met een gemiddelde zekerheid:

16 Wat is het effect van verschillende getij-regimes op de advectie van microplastics?

3.6.4 Ontbrekende meetgegevens voor kalibratie/validatie

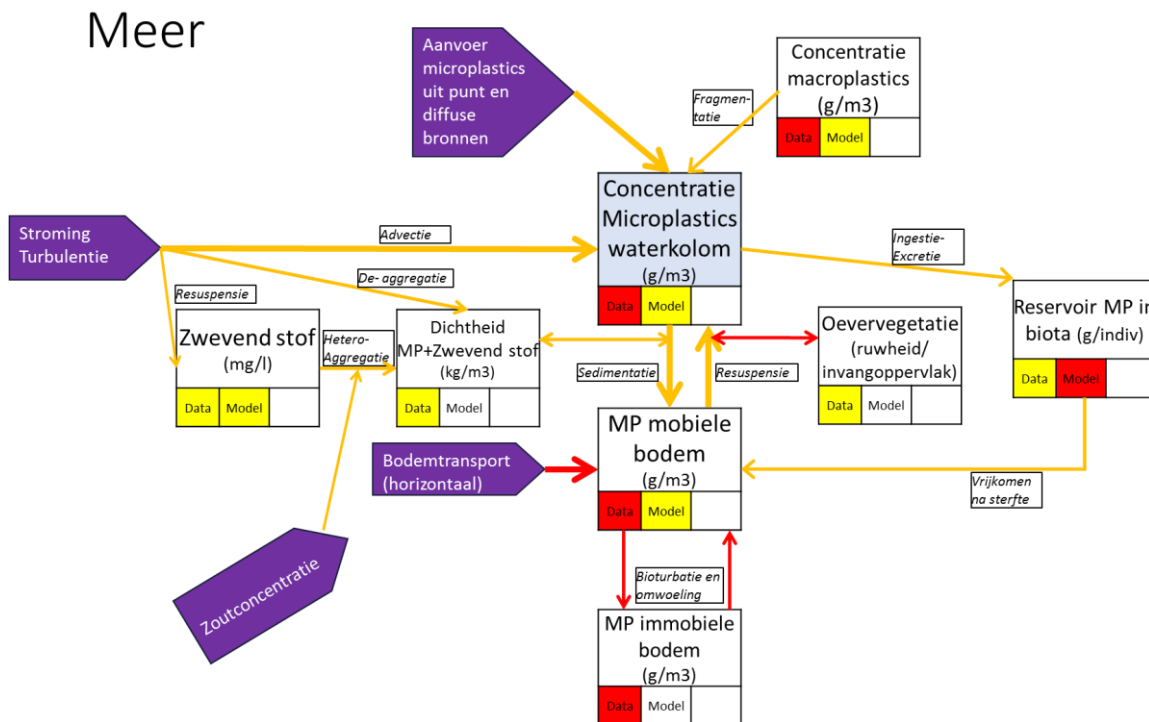
De ontbrekende meetgegevens die relevant zijn voor de andere milieus; hoeveel microplastics worden in waterkolom gevonden, hoeveel in de mobiele bodem, etc. gelden ook voor estuaria.

3.7 Verrijkte effectketen meer

In dit hoofdstuk worden alleen de veranderingen ten opzichte van de voorgaande effectketens weergegeven om herhaling te voorkomen.

3.7.1 Toelichting effectketen

In Figuur 3.6 wordt de effectketen van de bepalende processen voor de verspreiding van microplastics weergegeven.



Figuur 3.6 Verrijkte effectketen microplastics modellering in meren. MP = microplastics

Ten opzichte van de effectketen van rivieren is hier oevervegetatie niet als steunvariabele aanwezig. Daarnaast zijn de relaties tussen reservoir biota en microplastics in de waterkolom van gemiddeld belang en hebben zij een gemiddelde zekerheid. Ditzelfde geldt voor de relatie tussen het reservoir biota en de bijdrage aan microplastics in de mobiele bodem. In rivieren zijn deze relaties van klein belang en gemiddelde zekerheid.

3.7.2 Huidige procesformulering

Deltares heeft geen ervaring met het modelleren van de verspreiding van microplastics in meren.

3.7.3 Benodigde aanpassingen procesformulering

Onbekend.

3.7.4 Kennisleemtes

Er worden geen additionele kennisleemtes geïdentificeerd in de verrijkte effectketen voor meren.

3.7.5 Ontbrekende meetgegevens voor kalibratie/validatie

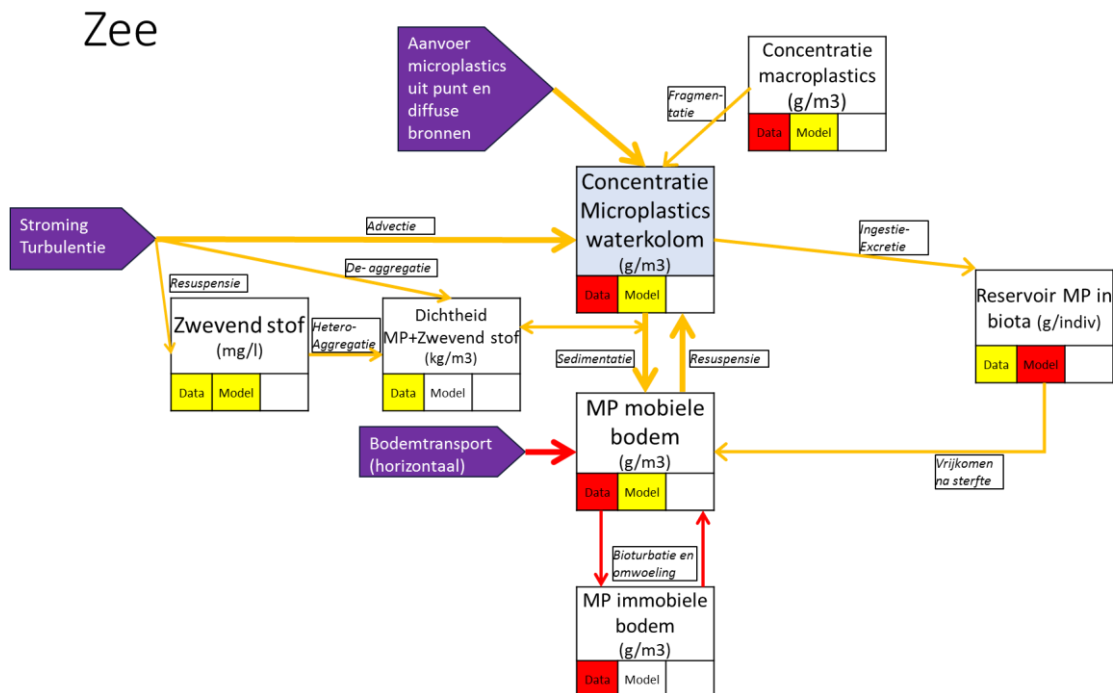
De ontbrekende meetgegevens die relevant zijn voor de andere milieus; hoeveel microplastics worden in waterkolom gevonden, hoeveel in de mobiele bodem, etc. gelden ook voor meren.

3.8 Verrijkte effectketen zee

In dit hoofdstuk worden alleen de veranderingen ten opzichte van de eerdere effectketens weergegeven om herhaling te voorkomen.

3.8.1 Toelichting effectketen

In Figuur 3.7 wordt de effectketen van de verspreiding van microplastics in zee weergegeven.



Figuur 3.7 Verrijkte effectketen microplastics modellering in zee. MP = microplastics

Voor de verrijkte effectketen van zee worden geen veranderingen in de relaties en de belangrijkheid hiervan gevonden ten opzichte van de eerdere effectketens.

3.8.2 Huidige procesformulering

Deze is hetzelfde als voor rivieren, zie sectie 3.4.2.

3.8.3 Benodigde aanpassingen procesformulering

Naar verwachting hoeft er niet veel aan de procesformuleringen te gebeuren: de wiskundige beschrijving zoals die gebruikt is door Unice et al. (2018) zou voldoende moeten zijn. De aandacht moet daarentegen uitgaan naar het inschatten van de procesparameters, als het even kan op basis van veldgegevens en anders op basis van laboratoriumexperimenten.

3.8.4 Kennisleemtes

Er wordt de volgende additionele kennisleemte geïdentificeerd in de verrijkte effectketen voor zee.

Belangrijke relaties met een gemiddelde zekerheid:

17 Bij welke dichtheid van microplastic deeltjes treedt er sedimentatie op van microplastics naar de mobiele zeebodem?

3.8.5 Ontbrekende meetgegevens voor kalibratie/validatie

De ontbrekende meetgegevens die relevant zijn voor de andere milieus; hoeveel microplastics worden in waterkolom gevonden, hoeveel in de mobiele bodem, etc. gelden ook voor zee.

4 Visie modelinstrumentarium 2023 voor microplastics

4.1 Algemeen

Dit hoofdstuk geeft de benodigde uitbreiding van het modelinstrumentarium weer om het transport van microplastics in Rijkswateren te modelleren ten opzichte van het huidige modelinstrumentarium. De twee toepassingen waarop deze roadmap is gericht hebben een verschillend detailniveau van modellering nodig. Om deze reden is voor ieder van de toepassingen apart een visie opgesteld.

4.2 PART geschikt maken voor D-hydro

PART wordt momenteel gebruikt in combinatie met 3D hydrodynamische modellen in Delft3D 4. In D-hydro is momenteel alleen transport van deeltjes ingebouwd voor 2D dieptegemiddelde modellen. Om PART functionaliteit toe te kunnen passen in 3D moet die functionaliteit in D-Hydro worden toegevoegd. Bovendien zijn er nog geen processen voor deeltjes beschikbaar in de D-Flow FM. Twee mogelijkheden bestaan om het mogelijk te maken D-particle tracking (opvolger van PART) te combineren met 3D D-Hydro modellen:

- a) De rekenkern van het ongestructureerde deeltjestransport in PART inbrengen en de processen van PART daarop laten aansluiten. Dit zal via dezelfde communicatiefile moeten lopen als nu vanuit D-Hydro naar D-Water Quality wordt gecommuniceerd. De informatie die nodig is kan direct gehaald worden uit de methode die binnen D-Hydro is gerealiseerd.
- b) Het inbrengen van de processen van PART binnen de gekoppelde D-Hydro, hetgeen betekent dat de berekening parallel loopt met D-Hydro en niet via een communicatiefile. Dit is ook een weg die met D-Water Quality is ingeslagen. Bij D-Water Quality is wel de mogelijkheid open gelaten om D-Water Quality ook off-line (dus zonder een directe koppeling) te draaien. Als PART ook offline gedraaid wenst te worden op ongestructureerde roosters, dan is het nodig ook optie a) te realiseren.

4.3 WAQ-PART koppeling

Een basale koppeling tussen WAQ en PART bestaat waarbij PART informatie kan overdragen naar WAQ. De integratie tussen beide systemen kan aanzienlijk worden verbeterd zodat gesproken kan worden over een model systeem met een gekoppelde deeltjes en algemene waterkwaliteitsmodel. Hiermee kan optimaal gebruik gemaakt worden van de sterktes van beide systemen (paragraaf 2.2.3) om het gedrag van deeltjes te simuleren.

Informatie van het waterkwaliteitsmodel (bijvoorbeeld concentraties van algen en bacterien) kan worden gebruikt om het gedrag van deeltjes te beïnvloeden (bijvoorbeeld biofouling en de invloed op de valsnelheid van de deeltjes). In het algemene WAQ model kan sediment/water interactie beter worden beschreven dan in PART en ook processen zoals flocculatie zijn in PART niet maar in WAQ wel goed te beschrijven. Een goede integratie tussen beide systemen maakt het ook mogelijk om tijdafhankelijke processen beter te beschrijven omdat in PART deeltjes een eigen leeftijd hebben wat binnen WAQ niet mogelijk is. Het betekent ook dat de verschillende ruimte en tijdschalen binnen een modelsysteem kunnen worden beschreven en aan elkaar gekoppeld kunnen worden.

De stappen die nodig zijn voor realisatie van de WAQ-PART koppeling zijn:

- 1 Integratie van de D-Particle Tracking en D-Water Quality invoer naar 1 invoerfile. Het aanzetten van het deeltjesmodel gaat dan via de invoer van en D-Water Quality. Hoe dit precies geïmplementeerd zou moeten worden is nog open voor discussie, omdat hier nog een aantal opties voor zijn. Er is al eens een brainstorm sessie geweest daar over, en het lijkt realiseerbaar.
- 2 Aanpassing van de interface (Deltashell) aan de nieuwe invoer.

Deze stappen van een mogelijke koppeling van PART en WAQ en het geschikt maken van PART voor ongestructureerd rekenen zijn opgenomen in de Meerjarenagenda van Waterkwaliteit en ecologisch modelleren dat nog in ontwikkeling is (in samenwerking met RWS). Een besluit hierover en een planning hiervoor zijn nog niet bekend.

4.4 Toepassing 1: verspreiding in Rijkswateren

4.4.1 Algemeen

Voor het transport van microplastics naar, in en uit de Rijkswateren dient een groot gebied te worden gemodelleerd. Om de verspreiding te modelleren zullen ook in 2023 meerdere schematisaties nodig zijn, waarbij de resultaten van microplastics transport op modelranden naar benedenstrooms worden doorgegeven. Zo wordt bijvoorbeeld voorzien dat rekenresultaten van het Rijntakken model worden doorgegeven aan het Rijn-Maasmonding model en vervolgens aan het Noordzee model. Het wordt voorzien dat de software WAQ wordt gebruikt voor alle Rijkswateren en voor ieder van de varianten voor uitbreiding van het modelinstrumentarium (zie het overzicht in Tabel 4.1).

Het transport in een rivier en een kanaal kan goed worden berekend met een tijdstap van 1 dag. Als simulatieperiode lijkt 1 jaar goed, zodat het effect van meerdere condities op het transport van microplastics gemodelleerd wordt. Daarbij wordt opgemerkt dat tijdens een hoogwater het transport van microplastics zeer hoog kan zijn. Om die reden kunnen gedurende een dergelijk hoogwater de microplastics opgeslagen in de mobiele bodem, oevers en uiterwaarden via resuspensie in de waterkolom komen. In enkele dagen kan mogelijk de helft van het jaarlijkse transport plaats vinden. Bij de keuze van een periode dient rekening gehouden te worden met dit doorspoelen van de rivier/kanaal bij een hoogwater.

Voor estuaria en de zee kan goed een tijdstap van een 1 uur worden gehanteerd, zodat de variatie door het getij wordt berekend. Ook voor deze systemen is een simulatieperiode van 1 jaar voldoende, zodat seizoensfluctuaties worden meegenomen en uitspraken over jaarlijkse transporten gedaan kunnen worden. Voor meren reageert de concentratie van microplastics in de waterkolom trager dan in de meeste watersystemen. Midden op zee kan de verblijftijd vergelijkbaar lang zijn. De uitwisseling met de mobiele bodem is op lange termijn van belang en ook kan de ingestie door schelpdieren over langere tijd een significant hebben op de microplastics concentratie. Om die redenen wordt voorzien een simulatieperiode van 10 jaar te hanteren, zodat bepaald kan worden of de evenwichtsconcentratie in de waterkolom in het model is bereikt.

Bij modellering op deze grote ruimtelijke schaal van een watersysteem en met deze tijdschaal wordt het niet haalbaar geacht voor alle watersystemen om de berekeningen met een 3D hydrodynamisch model uit te voeren. Voor rivieren en kanalen (zonder gelaagdheid) is de variatie met de diepte van de concentratie microplastics doorgaans niet van belang op deze grotere schaal. Bovendien is de variatie in de breedte niet van groot belang, mits uitwisselingen met havens en andere aantakende watersystemen niet van groot belang is.

Dus is een 1D model voldoende voor rivieren en kanalen op deze grote schaal. Een dieptegemiddeld 2D model zou ook kunnen, maar dat heeft in rivieren en kanalen weinig meerwaarde boven een 1D model op deze grote schaal voor het berekenen van de microplastics concentratie. In estuaria, meren en de (Noord)zee wordt het transport van microplastics beïnvloed door gelaagdheid en wordt voorzien een 3D model te gebruiken voor ieder van de drie varianten.

Tabel 4.1 Modelkeuzen per watersysteem van de Rijkswateren geldig voor ieder van de drie varianten voor uitbreiding van het modelinstrumentarium voor toepassing 1

Gebied	Tijdstap (uren)	Duur simulatieperiode (dagen)	Software	Dimensie model	hydrodynamisch
Rivieren	24	365	WAQ	1D	
Kanalen	24	365	WAQ	1D	
Estuaria	1	365	WAQ	3D	
Meren	24	3650	WAQ	3D	
Zee	1	365	WAQ	3D	

4.4.2 Laag ambitieniveau

De variant met laag ambitieniveau voor het modelinstrumentarium om het transport van microplastics in de waterkolom te bepalen is om de huidige software (SIMONA, Delft3D 4-FLOW, SOBEK, Delft3D-WAQ en Delft3D-PART) te gebruiken. Voor de rivieren en kanalen wordt een model opgezet, zoals eerder is opgezet voor de Duitse Rijn (Zillien, 2018). De processen die worden gemodelleerd zijn slechts een deel van de effectketen: Advectie, resuspensie, sedimentatie en aanlanding (Tabel 4.2). De bronnen in Nederland kunnen op vergelijkbare manier geschat worden met een emissiemodel.

Voor de estuaria en meren wordt eenzelfde model opgezet gehanteerd. Voor de zee wordt het model gebruikt dat voor CleanSea is opgezet als basis.

Voor deze variant met laag ambitieniveau is mogelijk de grootste inspanning om te realiseren dat in 2023 voldoende meetgegevens beschikbaar zijn voor validatie in de ruimte en de tijd. Op basis van die gegevens kan de conclusie dat deze modellering met een beperkte hoeveelheid processen al redelijk voldoet. De conclusie kan ook zijn dat het modelinstrumentarium het gedrag van microplastics nog niet goed weergeeft.

Tabel 4.2 Per variant van het ambitieniveau voor het modelinstrumentarium in 2023 de processen die worden meegenomen in de berekening

Watersysteem	Minimaal	Optimaal	Maximaal
Alle vijf	5. Advectie 6. Sedimentatie 7. Resuspensie	8. Advectie 9. Sedimentatie 10. Resuspensie 11. Aggregatie met zwevende stof 12. Veroudering 13. Biofouling	14. Advectie 15. Sedimentatie 16. Resuspensie 17. Aggregatie met zwevende stof 18. Veroudering 19. Biofouling 20. Homo-aggregatie 21. Fragmentatie 22. Degradatie 23. Aggregatie met plastics 24. De-aggregatie 25. Bioturbatie
Rivieren	Aanlanding	Aanlanding	
Kanalen		[ook met invloed obstakels in de waterweg]	
Meren			26. Opslag in biota bodem 27. Opslag in biota waterkolom
Estuaria			
Zee			

4.4.3 Gemiddeld ambitieniveau

Voor de variant met gemiddeld ambitieniveau van het modelinstrumentarium worden de processen zoals beschreven in de effectketen gemodelleerd, behalve enkele processen met een minder groot belang (Tabel 4.2). De interactie met organismen (ingestie, excretie en opslag), bioturbatie en de-aggregatie worden niet meegenomen. De immobiele bodem wordt niet gemodelleerd als steunvariabele, omdat de processen te onzeker zijn en waarschijnlijk nog wel even blijven en omdat gegevens voor validatie ontbreken.

Aangezien met een breedte- en dieptegemiddeld model voor rivieren het achterblijven van microplastics in uiterwaarden tijdens een verhoogde afvoer niet goed kan worden berekend, is het goed om voor dit grootschalige 1D model bij overstroming van de uiterwaarden een term toe te voegen waar microplastics achterblijven ('sink'). De grootte van deze 'sink' kan worden bepaald door voor verschillende waterstanden PART-simulaties te doen voor een uitsnede van een 3D model van een uiterwaard. Op basis van het aantal deeltjes dat per uiterwaard achterblijft kan deze 'sink' afhankelijk van de waterstand en duur van deze waterstand worden gekwantificeerd. Deze 'sinks' voor het 1D-model kunnen worden gebruikt voor alle gebieden die overstromen bij een verhoogde afvoer of door een verhoogde zeewaterstand door windopzet. Deze berekening kan los met PART uitgevoerd worden, maar beter en eenduidiger is om deze berekening uit te voeren met de gecombineerde WAQ-PART software.

Door verschillende typen plastics te modelleren (dichtheid, vorm, grootte) ontstaat een beeld van het gedrag van de microplastics met verschillende eigenschappen. Ook bij het beschouwen van het transport en de routes van de verschillende typen microplastics is het belangrijk te analyseren wat de rol van verschillende condities. In het geval van rivieren bijvoorbeeld worden microplastics lichter dan water (zoals polyethyleen en polypropyleen) mogelijk grotendeels getransporteerd met iedere afvoer, terwijl de zwaardere plastics (zoals PVC) deels sedimenteren tijdens lagere afvoer en resuspensie hiervan bij een verhoogde afvoer mogelijk leidt tot verhoogde concentraties.

4.4.4 Hoog ambitieniveau

Voor de variant met hoog ambitieniveau van het modelinstrumentarium worden alle processen zoals beschreven in de effectketen gemodelleerd (Tabel 4.2) en wordt de immobiele bodem als steunvariabele gemodelleerd. Een randvoorwaarde voor het gereed hebben van deze variant in 2023 is dat onderzoek leidt tot bruikbare procesformuleringen. Door onderzoek moeten kennisleemten worden ingevuld en moeten procesformuleringen beschikbaar te komen. Vooral gaat het om de uitwisseling met de immobiele bodem (bioturbatie en omwoeling) en de rol van organismen op de concentratie en het transport van microplastics in de waterkolom. Overige kennisleemten worden beschreven in hoofdstuk 5.

4.5 Toepassing 2: ondersteuning bij monitoring microplastics concentratie

4.5.1 Algemeen

Voor het extrapoleren van monitoring op een punt naar de hele diepte (en breedte voor rivieren, kanalen en estuaria) van de waterkolom en om in te kunnen schatten hoe de microplastics concentratie verloopt tussen de metingen door is detailmodellering nodig. Met een 3D hydrodynamisch model gekoppeld aan PART kan de concentratie microplastics worden berekend op een bepaalde plaats (x,y,z) en tijd. Ook kan met een dergelijk model vooraf aan het plaatsen van een nieuwe monitoring locatie worden bepaald hoe de concentratie van microplastics varieert met de plaats (x,y,z) en met verschillende condities.

Wanneer vertrouwd wordt op de extrapolatie door een model is het belangrijk dat alle relevante processen zijn meegenomen. Om die reden is alleen voor de varianten met gemiddeld en hoog ambitieniveau PART modellering beschreven. Voor alle varianten is de voorwaarde dat een grootschalig model beschikbaar is.

4.5.2 Laag ambitieniveau

Voor de variant met laag ambitieniveau voor het modelinstrumentarium in 2023 wordt de variant met gemiddeld ambitieniveau van het grootschalige model ook voor deze monitoring toepassing ingezet (Tabel 4.1 en Tabel 4.2). De resultaten uit de grootschalige modellen kunnen gebruikt worden om de orde van grootte te vergelijken van de concentratie microplastics. Het effect van gebeurtenissen die tot verhoogde concentratie van microplastics leiden kunnen ruw worden gesimuleerd en vergeleken op rode van grootte met tijdseries van een puntmeting.

4.5.3 Gemiddeld ambitieniveau

Voor de variant met het gemiddeld ambitieniveau van het modelinstrumentarium in 2023 wordt voor een gedeelte van een Rijkswater een 3D hydrodynamisch model opgezet met PART. Technisch is het mogelijk om een 2D dieptegemiddeld model te koppelen met PART, maar dit wordt niet geadviseerd. Redenen zijn dat het effect van obstakels (kribben, ondieptes, kunstwerken) op de ruimtelijke variatie in de concentratie microplastics niet goed kan worden bepaald. Bovendien wordt secundaire stroming niet goed weergegeven in een dieptegemiddeld model, terwijl dit wel een effect heeft op de ruimtelijke variatie in de concentratie microplastics.

De randvoorwaarden van water en microplastic transport voor dit 3D detailmodel worden bepaald met het grootschalige model. De ruimtelijke dimensies van het model worden gekozen zodat de rekentijd beheersbaar blijft, waarbij gedacht wordt aan orde 10 km (Tabel 4.3 geeft een overzicht voor de varianten met gemiddeld en hoog ambitieniveau). Alle processen uit de effectketen worden meegenomen (variant met hoog ambitieniveau voor toepassing 1; Tabel 4.2) om het model zo goed mogelijk de werkelijkheid te laten weergeven. Door al deze geselecteerde processen mee te nemen is de verwachting dat de ruimtelijke variatie van de microplastics concentratie het best wordt weer gegeven.

De tijdstap van het model hangt af van de gekozen ruimtelijke resolutie en zal orde 10 minuten zijn (Tabel 4.3). De simulatieperiode hangt af van de momenten waarop metingen beschikbaar zijn om mee te vergelijken. Minimaal dienen 2 metingen beschikbaar te zijn in de simulatieperiode en beter 3 meetpunten. MWTL metingen worden vaak iedere 2 weken uitgevoerd, maar soms ook slechts iedere 4 weken. Deze tussenperioden zijn beiden lang, waardoor de metingen onafhankelijk zijn. Op basis van dergelijke metingen kan niet goed worden bepaald of het model een stijging in microplastics concentratie juist aangeeft (en om de goede redenen). Om deze reden zijn enkele hoogfrequente dataserieën nodig, waarmee het model gekalibreerd en gevalideerd kan worden. De simulatieperiode omvat dan de meetmomenten uit de hoogfrequente data. Validatie van dergelijke detailmodellen zal alleen mogelijk zijn met deze speciale incidentele metingen, waarbij de ruimtelijke variatie goed in beeld wordt gebracht.

Op locaties waar de uitwisseling met de mobiele bodem en ook de ingestie en excretie door schelpdieren van belang zijn, wordt de simulatieperiode verlengd tot 300 dagen. Met dit model kunnen meerdere simulaties worden uitgevoerd binnen een jaar, zodat uitkomsten daarmee representatief kunnen zijn voor een jaargemiddeld transport van microplastics in de waterkolom.

Tabel 4.3 Modelkeuzen per watersysteem van de Rijkswateren geldig voor de varianten gemiddeld en hoog ambitieniveau voor toepassing 2 (WAQ-PART betekent een module met de functionaliteit van het huidige WAQ en PART gecombineerd)

Gebied	Tijdstap (uren)	Duur simulatieperiode (dagen)	Software	Dimensie model	hydrodynamisch
Rivieren	~0,15	30	PART of WAQ-PART	3D	
Kanalen	~0,15	30	PART of WAQ-PART	3D	
Estuaria	~0,15	30	PART of WAQ-PART	3D	
Meren	~0,15	300	PART of WAQ-PART	3D	
Zee	~0,15	30	PART of WAQ-PART	3D	

4.5.4 Hoog ambitieniveau

De variant met een hoog ambitieniveau van het modelinstrumentarium in 2023 is hetzelfde als de variant met een gemiddeld ambitieniveau (Tabel 4.3). Het verschil met deze gemiddelde variant is dat meer uitsneden worden gemaakt en voor meer condities simulaties worden uitgevoerd. Daarmee zal op basis van deze variant met hoog ambitieniveau het best kunnen worden bepaald waar en met welke afhankelijkheid extra bron- of 'sink'-termen toegevoegd kunnen worden om de grootschalige modellering bij toepassing 1 te verbeteren.

4.6 Toepassingen 3-5

Voor toepassingen 3 tot en met 5 wordt kort de consequentie van de gemaakte keuzen aangegeven. Eerst worden deze toepassingen herhaald:

- Op termijn ondersteuning bij het bepalen van een verzamelstrategie.
- Op termijn het kwantificeren van microplastics transporten uit Nederlandse bronnen.
- Op termijn het kwantificeren van effecten van microplastics op de chemische waterkwaliteit en op natuur.

Voor toepassing 3 over het bepalen van een verzamelstrategie zijn de varianten met gemiddeld en hoog ambitieniveau voor toepassing 2 nodig. Op basis van de inzichten en resultaten van de detailmodellen kunnen goede locaties worden bepaald voor het op termijn verzamelen of opruimen van microplastics uit de waterkolom. Op deze locaties zal het transport van microplastics relatief hoog moeten zijn, zodat effectief opgeruimd kan worden. Deze resultaten kunnen ook gebruikt worden voor het bepalen van de meest effectieve locatie voor cleanup acties (door vrijwilligers).

Toepassing 4 is het kwantificeren van microplastics transporten uit Nederlandse bronnen. Het is een noodzakelijke voorwaarde om kwantitatief goede tijdseries te hebben voor de grootschalige toepassing in toepassing 1.

Toepassing 5 is het kwantificeren van effecten van microplastics op de chemische waterkwaliteit en op natuur. Dit kunnen verschillende effecten zijn. Onderzoek moet in veel gevallen nog leiden tot procesformuleringen die gebruikt kunnen worden voor de modellering van de effecten. Een voorbeeld van een proces relevant voor de chemische waterkwaliteit is cotransport, waarbij chemische stoffen hechten aan microplastics. Een dergelijk plastic deeltje kan op deze manier de chemische stof transporteren tot in organismen. Een ander

voorbeeld van een toekomstige toepassing van het modelinstrumentarium is het indentificeren van risico-gebieden voor schelpdieren en natuur. Hiervoor is aanvullend op het modelleren van de ruimtelijke variatie in de concentratie microplastics kennis nodig over drempelconcentraties vanaf wanneer eerste, serieuze en dramatische effecten optreden voor schelpdieren en de natuur.

De varianten voor zowel toepassingen 1 (grootschalig) als toepassing 1 (kleine schaal) leiden tot inzicht in de concentraties van (verschillende typen) microplastics. Deze resultaten zullen de basis zijn voor effectmodellering. Voor zover nu te overzien kunnen relevante processen worden gemodelleerd met de procesbibliotheek van WAQ of daar eenvoudig aan toegevoegd kunnen worden.

4.7 Niet meegenomen processen

Op basis van deze visies worden maximaal de processen voor transporten meegenomen in het modelinstrumentarium van 2023 die zijn opgenomen in de effectketens. Dit betekent dat voor alle zes varianten de processen beschreven in Tabel 4.4 niet worden meegenomen. In de tabel staat een reden hiervoor genoemd. De-aggregatie is ook opgenomen, hoewel deze in de effectketens staat. De reden hiervoor is dat de-aggregatie in de huidige praktijk niet wordt meegenomen.

Tabel 4.4 Processen die niet zijn meegenomen in de effectketens, omdat de inschatting is dat deze niet bepalend zijn voor het transport van microplastics

Proces	Reden
Homo-aggregatie	Plastic deeltjes kunnen theoretisch aggregeren, maar vaker aggregeren zij vanwege ladingsverschillen aan sediment deeltjes (zwevende stof)
Degradatie	Verandering van plastic deeltjes onder invloed van UV- Licht, mechanische stress, thermische en microbiële activiteit is alleen op langere tijdschalen van belang. Van groter belang voor de modellering is het inschatten van fragmentatiesnelheden, waar degradatie aan bijdraagt.
Veroudering	Het brozer worden van plastics als gevolg van degradatie is nog onbekend en mogelijk niet van groot belang gedurende de verblijftijd in de waterkolom in Rijkswateren. Van groter belang voor de modellering is het inschatten van fragmentatiesnelheden, waar veroudering aan bijdraagt.
Fragmentatie	Door veroudering en degradatie ontstaan kleinere deeltjes. Dit is alleen op langere tijdschalen van belang (mogelijk wel voor meren en zee van belang). Op plaatsen waar plastics gevangen worden en bloot zijn gesteld aan stroming of golven, kan fragmentatie sneller gaan en zou het wel relevant kunnen zijn. De kennis is nu te beperkt om de fragmentatiesnelheid te kwantificeren afhankelijk van condities.
(Bio)Fouling	Dit proces is mogelijk belangrijk, maar nog niet goed te kwantificeren
De-aggregatie	Over het algemeen worden deeltjes die eenmaal zijn geaggregeerd niet snel weer van elkaar gescheiden

5 Stappenplan verbeteren modellering verspreiding microplastics

5.1 Inleiding

Het stappenplan dat beschreven is in dit hoofdstuk is gebaseerd op de varianten met gemiddelde en hoog ambitieniveau voor het modelinstrumentarium. Voor toepassing 1 is een opbouw mogelijk, waarbij richting 2023 steeds meer processen worden meegenomen in de modellering met als voorwaarde dat een procesformulering beschikbaar is (gekomen). Voor toepassing 2 is de visie van Deltares om toe te werken naar de variant met gemiddeld ambitieniveau, waarvoor alle processen beschreven in de effectketens zijn opgenomen. De stappen zijn voor drie perioden (2019, 2020-2021 en 2022-2023) aangegeven.

Voor 2019 is het vooral van belang om kennisleemten op te vullen en bruikbare meetgegevens te verzamelen. Deze eerste twee punten hebben de grootste prioriteit. Het modelinstrumentarium in WAQ (toepassing 1) wordt opgezet in 2020-2021 en compleet gemaakt in 2022-2023. Voor 2022-2023 wordt de variant met gemiddeld ambitieniveau van het modelinstrumentarium voor toepassing 2 afgerond. Het belang van het continueren van goede vaste en incidentele monitoring blijft groot.

5.2 Voorstel activiteiten korte termijn (2019)

5.2.1 Databehoeft

Als belangrijkste stap zien we om structureel meetgegevens te gaan verzamelen op verschillende locaties in de Rijkswateren. Momenteel zijn meetgegevens alleen beschikbaar uit incidentele metingen. Daarmee zijn metingen (zeer) beperkt beschikbaar, waardoor de validatie en kalibratie van modellen op het moment niet goed plaats kan vinden (data blokje is vaak rood in de effectketens voor toepassing 1). Rijkswaterstaat werkt aan het uitbreiden van de monitoring en bereidt een Projectplan 'Intensivering aanpak zwerfafval in rivieren' voor. Het uitvoeren van een dergelijk plan op korte termijn is nodig om uitspraken te kunnen doen hoe goed het transport van microplastics in grootschalige modellen wordt berekend. Voor toepassing 2 zijn incidentele metingen nodig om de berekende ruimtelijke variatie van microplastics te valideren met meetgegevens.

Zonder meer meetgegevens in vooral rivieren, kanalen, meren en estuaria heeft het weinig nut om modellen op te gaan zetten, omdat de waarde van de modeluitkomsten dan niet ingeschat kan worden. Er is gebrek aan data voor het kalibreren en valideren van een aantal belangrijke ondersteunende variabelen en de doelvariabele zelf. Gegevens om deze vragen te beantwoorden zijn nodig voor verschillende condities en voor de verschillende watersystemen:

- Wat is de aanvoer van microplastics vanuit rivieren en het mariene milieu?
- Hoeveel microplastic deeltjes zitten er in de waterkolom?
- Hoeveel microplastic deeltjes zitten er in de mobiele bodem?
- Hoeveel microplastics worden er gevonden in en voor oevervegetatie/obstakels in de waterweg?

Gerelateerd aan veroudering, fragmentatie en fouling zijn ook de volgende meetgegevens van belang:

- Wat is de verhouding tussen macro- en microplastics in het aquatische milieu?
- Hoeveel microplastics kan een stuk macroplastic genereren?
- Wat is de dichtheid van 'schone' en 'gefolde' microplastics?

Naast het beantwoorden van deze kennisvragen met meetgegevens, is het belangrijk om incidentele hoogfrequente metingen te doen, zodat goede validatiedatasets beschikbaar komen voor de modellering.

5.2.2 Kennisleemtes

De kennisleemtes die van belang zijn om op korte termijn te adresseren zijn afgeleid van het belang van de relatie en de zekerheid uit de verrijkte effectketens, waarbij de meest belangrijke en meest onzekere relaties als eerste worden genoemd:

- Bij welke kritieke bodemschuifspanning wordt resuspensie van microplastics tot stand gebracht?
- Onder welke condities aggregeren microplastics met zwevend stof (inclusief zoutconcentratie)?
- Bij welke dichtheid van microplastics en zwevend stof sedimenteren deze deeltjes van de waterkolom naar de mobiele bodem?
- Bij welke dichtheid van microplastics en zwevend stof komen deze deeltjes van de mobiele bodem in suspensie in de waterkolom?
- Wat is het effect van verschillende getij-regimes op de advectie van microplastics?
- Wat is de rol van oevervegetatie/obstakels in de waterweg in de sedimentatie en resuspensie van microplastics? En bij welke verhouding tussen vegetatiebedekking en water treedt er een effect op?

Om de variant met gemiddeld ambitieniveau voor toepassing 1 te kunnen uitvoeren moeten er ook vragen worden beantwoord rondom veroudering en biofouling. De meest belangrijke vragen hierbij zijn:

1. Hoe snel fragmenteren macroplastics in micro en nanoplastics en wat voor effect heeft dit op de dichtheid van de de plastics deeltjes?
2. Wat is het effect van biofouling op de dichtheid van microplastics?

5.2.3 Aanpassing software

Wanneer geen aanpassingen aan de software worden doorgevoerd, kan over enkele jaren geen gebruik meer worden gemaakt van PART. De volgende stappen zijn nodig om op korte termijn te zetten:

- 1 D-Hydro aanpassen voor 3D PART (zie de 2 mogelijkheden in paragraaf 4.2)
- 2 Integratie van WAQ en PART naar 1 invoerfile. Met dit gecombineerde WAQ-PART kan een deeltjesberekening via de invoer van WAQ aangezet worden. Dit kan op detailniveau op verschillende manieren geïmplementeerd worden.
- 3 Het interface (Deltashell) aanpassen, zodat de gebruiker de invoer kan aanleveren.

Het belang van deze software-aanpassingen is groot, aangezien anders voor microplasticmodellering geen gebruik kan worden gemaakt van de hydrodynamische D-hydro modellen die (gaan) worden opgezet.

5.2.4 Schematisaties

Voor toepassing 1 wordt een model opgezet voor het grootste deel van de rivieren door WAQ te koppelen aan het SOBEK 3 model voor de Rijntakken. Dit model koppelen met een WAQ-SOBEK 3 model voor de Rijn-Maasmonding. De bronnen in Nederland worden bepaald met een emissiemodel. Met deze twee modellen ontstaat een eerste inzicht in het transport van microplastics vanaf Lobith naar de Noordzee voor (waarschijnlijk) de belangrijkste route van microplastics.

Voor toepassing 2 wordt een eerste uitsnede gemaakt voor een deel van de Rijn en gekoppeld aan het bestaande PART. Mogelijk kan hiervoor worden aangesloten bij een 3D model welke wordt opgezet voor de Nieuwe Maas. Ook heeft een derde partij meetgegevens van microplastics concentratie op meerdere diepten beschikbaar voor verschillende condities. Mogelijk kan hiermee het model gevalideerd worden.

5.3 Voorstel activiteiten middel termijn (2020-2021)

5.3.1 Kennisleemtes

De kennisleemtes die van belang zijn om op middel termijn te adresseren zijn afgeleid van het belang van de relatie en de zekerheid, waarbij de gemiddeld belangrijke relaties als eerste worden genoemd. De kennis vragen zijn:

- Welke fractie van de microplastics worden via bioturbatie en omwoeling uitgewisseld tussen de mobiele en immobiele bodem, maar ook tussen de mobiele bodem en de waterkolom?
- Bij welke condities treedt de-aggregatie op?
- Bij welke condities wordt horizontaal transport van microplastics tot stand gebracht?
- Onder welke condities worden microplastics vanuit de waterkolom in organismen achtergehouden?
- Onder welke condities worden microplastics vanuit de mobiele bodem in organismen achtergehouden?
- Onder welke condities ontstaat een reservoir in biota en hoe groot is dit reservoir in relatie tot de microplastics in de waterkolom?

Om het maximale scenario van toepassing 1 te kunnen uitvoeren moeten er ook vragen worden beantwoord rondom fragmentatie, degradatie, homo-aggregatie en de-aggregatie. De meest belangrijke vragen hierbij zijn:

- Hoe snel fragmenteren verschillende typen (grootte, soort materiaal, vorm) plastics in het aquatische milieu
- Onder welke omstandigheden treedt degradatie van microplastics op en op welke tijden ruimteschalen is dit proces van belang?
- Onder welke omstandigheden vindt aggregatie plaats tussen microplastics onderling (homo-aggregatie)?
- Onder welke omstandigheden vindt de-aggregatie plaats tussen microplastics onderling?

5.3.2 Databehoefte

Gegevens om de kennisvragen voor deze middellange termijn te beantwoorden zijn voor de verschillende watersystemen:

- Hoeveel microplastic deeltjes uit de waterkolom en de bodem komen er via ingestie in organismen terecht en worden daarna opgeslagen?
- Hoeveel microplastic deeltjes komen er via excretie uit organismen in de waterbodem en waterkolom terecht?

Naast het beantwoorden van deze kennisvragen met meetgegevens, is het belangrijk om incidentele hoogfrequente metingen te doen, zodat voor steeds meer processen, watersystemen en condities inzicht in de processen en goede validatiedatasets beschikbaar komen.

5.3.3 Schematisaties

Voor deze middellange termijn is voorzien om voor toepassing 1 een WAQ model gekoppeld te hebben aan een hydrodynamische schematisatie. De modellering van 2019 wordt uitgebreid met het IJsselmeer, Zeeland, de Waddenzee en het Noordzeekanaal en het Amsterdam-Rijnkanaal. De variant met gemiddeld ambitieniveau is aan het eind van deze periode gereed.

5.4 Voorstel activiteiten lange termijn (2022-2023)

5.4.1 Kennisleemtes

In deze periode op de langere termijn komen kennisleemtes aan bod rondom de processen die wel relevant zijn voor het onderzoek naar microplastics, maar gerelateerd zijn aan toepassing 4 of 5. Hierbij zijn de volgende vragen van belang:

Welke fractie van de microplastics in het aquatisch milieu is afkomstig van atmosferische depositie?

Welke soorten en dichtheden van pathogenen in het aquatisch milieu komen voor op microplastics?

Wat is het effect van microplastics op ecosystemendiensten zoals de productiviteit van het ecosysteem?

Vanaf welke concentraties zijn microplastics een risico voor schelpdieren en natuur?

Wat is het effect van microplastics in het watersysteem op de humane gezondheid?

Tot op welk niveau worden microplastics afgebroken in het aquatische milieu; zijn dit losse monomeren of wordt het afgebroken tot op het niveau van atomen die weer beschikbaar zijn in de voedselketen?

5.4.2 Databehoefte

Het continueren van monitoring om de genoemde vragen voor de eerdere twee perioden te beantwoorden. Daarnaast zal het relevant blijken om incidentele hoogfrequente metingen te blijven doen, zodat voor steeds meer processen, watersystemen en condities inzicht in de processen en goede validatiedatasets beschikbaar komen.

5.4.3 Schematisaties

Voor deze lange termijn is voorzien om voor toepassing 2 de variant met gemiddeld ambitieniveau gereed te hebben.

Voor toepassing 1 wordt het aantal processen uitgebreid naar de variant met hoog ambitieniveau voor de watersystemen waar dat nodig is.

5.5 Na 2023

Wanneer de kennis over processen die momenteel onbekend of onzeker zijn is vergroot, kunnen deze processen worden meegenomen in de modellering. Gezien de tijd die doorgaans nodig is om van onderzoek te komen tot een procesformulering, is het waarschijnlijk dat enkele processen pas na 2023 kunnen worden meegenomen in de modellen.

5.6 Discussie

Deze roadmap is opgezet voor grotere microplastics. Plastic deeltjes kleiner dan 0,05 mm (inclusief nanoplastics) kunnen op een vergelijkbare manier worden gemodelleerd (Markus et al. 2016). Waarschijnlijk zijn dezelfde processen relevant voor het transport van deze kleinere deeltjes in de waterkolom als voor de grotere microplastics. Voor plastic deeltjes groter dan 5 mm kan de aanpak met PART modellering ook goed worden toegepast. Voor toepassing 1 met WAQ zijn er nog een aantal vragen of dit mogelijk is, zoals of de concentratie hoog genoeg van de plastic deeltjes die gemodelleerd worden.

6 Literatuuroverzicht

- Barboza, L. G. A., Vethaak, A. D., Lavorante, B. R., Lundebye, A. K., & Guilhermino, L. (2018). Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health. *Marine pollution bulletin*, 133, 336-348.
- Besseling, E., Quik, J.T., Sun, M. and Koelmans, A.A., 2017. Fate of nano-and microplastic in freshwater systems: A modeling study. *Environmental Pollution*, 220, pp.540-548.
- Deltares, 2015, Project Guanabara Limpa: Operational Modelling and Monitoring System of Floating Material and Water Quality in Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Deltares, brochure
- Hann, S., C. Sherrington, O. Jamieson, M. Hickman, P. Kershaw, A. Bapasola and G. Cole, 2018, Investigating options for reducing releases in the aquatic environment of microplastics emitted by (but not intentionally added in) products, Final Report for DG Environment of the European Commission.
- Hardesty, B.D., Harari, J., Isobe, A., Lebreton, L., Maximenko, N., Potemra, J.T., van Sebille, K., Vethaak, D., Wilcox, C., 2017. Using numerical model simulations to improve the understanding of micro-plastic distribution and pathways in the marine environment. *Front. Mar. Sci.* 4, 30.
- Jambeck, Jenna R., Geyer, Roland, Wilcox, Chris, Siegler, Theodore R., Perryman, Miriam, Andrady, Anthony, Narayan, Ramadi, Law, Kara Lavender, 2015, Plastic waste inputs from land into the ocean, *Science*, DOI: 10.1126/science.1260352
- Lebreton, Laurent C.M., Zwet, Joost van der, Damsteeg, Jan-Willem, Slat, Boyan, Andrady, Andreas and Reisser, Julia, 2017. River plastic emissions to the world's oceans. *Nature communications*. DOI: 10.1038/ncomms15611.
- Mani, T., A. Hauk, U. Walter and P. Burkhardt-Holm, 2015. Microplastics profile along the Rhine River. *Nature Scientific Reports*. DOI: 10.1038/srep17988
- Van der Meulen, M.D A. D. Vethaak, 2015. CleanSea, Deltares (brochure)
- Nizzetto, L., Bussi, G., Futter, M.N., Butterfield, D. and Whitehead, P.G., 2016. A theoretical assessment of microplastic transport in river catchments and their retention by soils and river sediments. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 18(8), pp.1050-1059.
- Stuparu, Dana, van der Meulen. Myra, Kleissen, Frank, Vethaak, Dick and El Serafy, Ghada, 2015. Developing a transport model for plastic distribution in the North Sea. 36th IAHR World Congress, The Hague.

- Unice, K.M., Weeber, M.P., Abramson, M.M., Reid, R.C.D., van Gils, J.A.G., Markus, A.A., Vethaak, A.D., Panko, J.M., 2018. Characterizing export of land-based microplastics to the estuary - Part I: Application of integrated geospatial microplastic transport models to assess tire and road wear particles in the Seine watershed, *Science of the Total Environment*.
- Unice, K.M., Weeber, M.P., Abramson, M.M., Reid, R.C.D., van Gils, J.A.G., Markus, A.A., Vethaak, A.D., Panko, J.M., 2018. Characterizing export of land-based microplastics to the estuary - Part II: Sensitivity analysis of an integrated geospatial microplastic transport modeling assessment of tire and road wear particles *Science of the Total Environment*.
- Van der Wal, M., M. van der Meulen, G. Tweehuijsen, M. Peterlin, A. Palatinus, M. Kovac Virsek, L. Coscia and A. Krzan, 2015, Identification and Assessment of Riverine Input of (Marine) Litter. Final Report for the European Commission DG Environment under Framework Contract No ENV.D.2/FRA/2012/0025.
- Zada, Liron, Leslie, Heachter A., Vethaak, A. Dick, Tinnevelt, Gerjen H., Jansen, Jeroen J., de Boer, Johannes F., Ariese, Freek, 2018. Fast microplastics identification with stimulated Raman scattering microscopy. *Wiley Journal of Raman Spectroscopy*. DOI: 10.1002/jrs.5367.